La Recherche

Françoise Combes

Astrophysicienne, Médaille d'or du CNRS

LES GALAXIES SONT AU CŒUR DE L'ÉVOLUTION DE L'UNIVERS

p.122

Anil K. Gupta

Spécialiste en innovation

LA SCIENCE DOIT ÊTRE UN BIEN COMMUN

p.6

La Recherche

LE MAGAZINE DE RÉFÉRENCE SCIENTIFIQUE - FÉVRIER / AVRIL 2021 - 9 € 90

L'ORIGINE DU VIVANT

Exobiologie, chimie interstellaire, ADN, cosmogonies, biosignatures, métabolismes primitifs p.16

Archéologie
L'INVENTION DU POUVOIR
p.60

Algorithmique
CRYPTOGRAPHIE ET VIE PRIVÉE
p.68

Neurosciences
LES GÈNES DE L'INSTINCT PARENTAL
p.92

Astrolinguistique
COMMENT COMPRENDRE LES ALIENS ?
p.140

Biologie
LE CORONAVIRUS AU MICROSCOPE
p.76

L'ORIGINE DU VIVANT

Février / Avril 2021 - 9 € 90

N° 564

mgen

GROUPE vyv

MA SANTÉ, C'EST SÉRIEUX.

J'AI CHOISI MGEN

MUTUELLE SANTÉ - PRÉVOYANCE

Perrine Laffont a choisi MGEN pour son action en faveur du sport et de la santé. MGEN une protection santé performante et d'authentiques valeurs de solidarité.

www.antigel.agency - 01974 - janvier 2021 - © Hervé Thouroude - Document publicitaire n'ayant pas de valeur contractuelle.

PERRINE LAFFONT

CHAMPIONNE OLYMPIQUE DE SKI DE BOSSES,
3 FOIS VICTORIEUSE DE LA COUPE DU MONDE

MGEN, Mutuelle Générale de l'Éducation Nationale, immatriculée sous le numéro SIREN 775 685 399, MGEN Vie, immatriculée sous le numéro SIREN 441 922 002, MGEN Filia, immatriculée sous le numéro SIREN 440 363 588, mutuelles soumises aux dispositions du livre II du Code de la mutualité. MGEN Action sanitaire et sociale, immatriculée sous le numéro SIREN 441 921 913, MGEN Centres de santé, immatriculée sous le numéro SIREN 477 901 714, mutuelles soumises aux dispositions du livre III du Code de la mutualité. Siège social : 3 square Max-Hymans -75748 Paris CEDEX 15.

Le silence éternel de ces espaces infinis…

À la question de l'origine de la vie, que *La Recherche* aborde dans ce « mook » (magazine-livre), répond celle de sa singularité. Notre planète est pour le moment le seul astre de l'Univers où les chercheurs puissent affirmer que la vie existe. Abondante et familière, elle est là, tout autour de nous : un chien, une fleur, une enfant qui court, une bactérie… un raton laveur. Quant à savoir si les conditions qui ont présidé à l'émergence du vivant ont pu se reproduire ailleurs dans le cosmos, les réponses ont oscillé au cours de l'histoire entre pluralité et unicité des mondes. Ainsi, quatre siècles avant notre ère, le philosophe grec Épicure considérait déjà que, si l'Univers est infini, on ne peut pas éviter un nombre infini de mondes comme le nôtre. Le monothéisme impose ensuite une vision de singularité avec la création divine de tout ce qui existe, et donc de la vie sur notre planète. Au XVIe siècle, le philosophe italien Giordano Bruno – qui sera brûlé pour cela – ébranle cette croyance en prolongeant notamment l'idée de Nicolas Copernic de la « banalité » de la Terre et du Soleil. Il estime là encore que, dans un Univers infini, le vivant ne peut pas être limité à la Terre. Une pensée alors plus dogmatique que scientifique, mais que la physique du XXe siècle n'a cessé depuis de renforcer : avec un petit nombre de lois fondamentales, et sachant que les mêmes causes produisent les mêmes effets, la vie devrait être universelle, ou tout du moins répandue. D'ailleurs, lors des premières missions spatiales qui se sont posées sur Mars en 1976, les scientifiques étaient tellement persuadés que la planète Rouge devait abriter du vivant que plusieurs des expériences étaient là uniquement pour étudier son métabolisme… Mais, à ce jour, les astrophysiciens n'en ont toujours pas trouvé trace. Aujourd'hui, c'est donc un peu machine arrière. L'inventaire des mondes planétaires dans notre Galaxie fait à nouveau ressortir la singularité du nôtre. La diversité des systèmes planétaires est en effet frappante : pas un système ne ressemble au Système solaire, pas une exoplanète ne ressemble à la Terre. S'il y a une forte contingence dans l'évolution du vivant, y en aurait-il aussi dans l'apparition même de la vie, faisant du vivant terrestre un exemple unique ? « *Dans cet Univers démesuré, affirmer qu'il n'y a pas* [d'autre] *vie ne revient-il pas à plonger un verre dans l'océan et conclure qu'il n'abrite pas de poissons ?* » interrogeait le biologiste Franck Courchamp **(1)**, résumant un état d'esprit plus optimiste. Le balancier entre unicité et pluralité du vivant continue d'osciller. Le silence des espaces infinis, effrayant pour Blaise Pascal, n'est peut-être pas éternel…

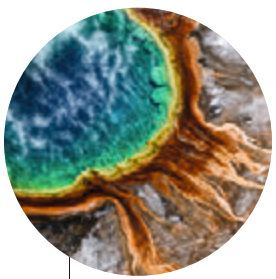
Philippe Pajot
RÉDACTEUR EN CHEF

(1) F. Courchamp, C. Morin, « Une espèce à part - Vie unique », série documentaire, 2018. tinyurl.com/arte-vie-unique

DR

SOMMAIRE

Février / Avril 2021 - n° 564



3 Édito

6 **GRAND ENTRETIEN AVEC ANIL K. GUPTA**
Innovateur
« La science doit être un bien commun »

14 Almanach

DOSSIER

16 **L'ALCHIMIE DU VIVANT**

18 Introduction

20 « Une question qui stimule l'imagination et l'intelligence »
Entretien avec Christophe Malaterre et Marie-Christine Maurel

26 Traquer les premières traces de vie terrestres
Frances Westall, Frédéric Foucher et Keyron Hickman-Lewis

32 Les six régions où affleurent les plus anciennes roches
Sylvain Guilbaud

34 L'exopaléontologie ou la quête d'organismes fossiles dans l'Univers
Jean-Sébastien Steyer

36 Remonter l'arbre généalogique des microbes
Mathias Germain

40 « La vie serait intimement liée à l'évolution de la Terre »
Entretien avec Jean-Pierre Bibring

43 Jupiter, maître de l'eau ?
Sean Raymond

44 Quatre lunes glacées à explorer
Philippe Pajot, avec Gabriel Tobie

46 Notre planète est-elle vraiment unique ?
François Forget

48 Une soupe primitive reproduite en laboratoire
Franck Daninos

52 Les recettes d'un métabolisme originel
Joseph Moran

54 Sur la piste de l'évolution moléculaire
Philippe Nghe

56 Des biochimies hypothétiques
Philippe Pajot

58 Start-up : ces chercheurs entrepreneurs étudient les confins du vivant
Pierre Vandeginste

FONDAMENTAUX

60 **PALÉOSOCIOLOGIE** D'où viennent les inégalités ?
Jean-Paul Demoule

68 **INFORMATIQUE** La nouvelle technologie de protection des données
Théo Ryffel

76 **BIOLOGIE** Portrait d'un virus planétaire
Mathias Germain

84 **SOCIÉTÉ** Les Français et la science : une crise de confiance ?
Daniel Boy

92 **NEUROSCIENCES** Les réseaux neuronaux de la parentalité
Catherine Dulac

100 **SPATIAL** Un nanosatellite français part affiner l'étude du climat
Sylvie Rouat

108 **CLIMAT** Un glacier sous couverture
Claudio Smiraglia, Loïc Chauveau

116 **DATA** L'édition scientifique fait sa révolution
Vincent Glavieux

122 **ASTRONOMIE** « Il reste de grands défis à relever en astrophysique »
Entretien avec Françoise Combes

LIVRES

130 La sélection de la rédaction

RÉFLEXIONS

134 Transition énergétique
Marie Dégremont

136 Numérique et IA *Chloé Clavel*

138 Éthique *Jean-Gabriel Ganascia*

SCIENCE ET FICTION

140 Astrolinguistique : parlez-vous alien ?
Frédéric Landragin

Ce numéro comporte un encart abonnement sur les exemplaires abonnés.

ANAMIKA DEY - SURANGAW/ GETTY IMAGES - PHOTO12/ALAMY/PUWADOL ET KITTIPONG - MARTIN PARR / MAGNUM PHOTOS

)i(interstices.info
site de culture scientifique publié par Inria
et animé par des scientifiques d'Inria,
du CNRS et des universités.

Explorez les sciences du numérique

sur le site **interstices.info**

une référence en ligne pour comprendre
la recherche en informatique
et en mathématiques appliquées

Entretien avec
Anil K. Gupta

LA SCIENCE DOIT ÊTRE UN BIEN COMMUN”

Pionnier des innovations de terrain, Anil K. Gupta a exercé pendant trente-six ans dans l'un des instituts de management les plus reconnus en Inde, l'Institut indien de management d'Ahmedabad. À l'origine de multiples initiatives, il défend l'idée selon laquelle les plus pauvres ont besoin d'un investissement accru dans le savoir plus que dans les choses matérielles – les intellectuels étant tenus de lutter pour favoriser la connaissance et le dialogue avec la population. En ces temps de pandémie, il estime que l'accent devrait être mis sur la prévention (qui pâtit de sous-investissements) plutôt que de surinvestir dans la médecine curative. Il a accepté de répondre aux questions de La Recherche *par visioconférence entre Ahmedabad et Paris.*

ANAMIKA DEY

Anil K. Gupta
INNOVATEUR
Biochimiste et généticien de formation, il a enseigné à l'Institut indien de management d'Ahmedabad.

Il a lancé de nombreuses initiatives, comme le réseau Honey Bee Network à la fin des années 1980 et la National Innovation Foundation (NIF) indienne en 2000.

BIO

- **1952** Il naît à Bulandshahar, en Inde.
- **1974** Il est diplômé de génétique biochimique à l'université d'agriculture Chaudhary Charan Singh Haryana.
- **1981** Il devient professeur au Centre de management de l'agriculture de l'Institut indien de management d'Ahmedabad.
- **1986** Il obtient un doctorat en management à l'université Kurukshetra.
- **1987-1988** Il crée Honey Bee Network, réseau dédié à l'innovation de terrain.
- **1993** Il fonde la Society for Research and Initiatives for Sustainable Technologies and Institutions (Sristi).
- **2000** Il lance la National Innovation Foundation (NIF) indienne.

La Recherche **Vous avez fondé le réseau Honey Bee Network (HBN), puis des institutions comme la Society for Research and Initiatives for Sustainable Technologies and Institutions (Sristi), le réseau Grassroots Innovation Augmentation Network (Gian) en 1997 et la National Innovation Foundation (NIF) indienne. Avec quels objectifs ?**

Anil K. Gupta En 1985-1986, je venais de rentrer du Bangladesh où j'étais consultant. Là-bas, j'aidais les scientifiques à tirer parti de ce qu'accomplissaient les petits paysans, qui, même sur une parcelle minuscule, menaient de nombreuses expériences avec une grande diversité. J'incitais aussi les scientifiques à s'engager auprès de cette population pauvre, de façon qu'ils puissent bénéficier de leur science, qu'elle leur soit plus utile. Et puis, quand je suis revenu en Inde, après avoir été payé en dollars, je me suis posé la question : est-ce que je suis payé plus grassement que d'habitude parce que je suis quelqu'un d'intelligent ? Ou bien est-ce parce que ceux dont j'ai appris sont, eux, intelligents ? Et je ne me suis pas senti différent de tous les autres exploiteurs. Il y a ceux qui exploitent le marché foncier, d'autres celui des matières premières ou du travail… Moi, j'exploitais le marché de la connaissance. Alors, en partie parce que je n'étais pas très content de moi, en partie à cause de la richesse de la connaissance de terrain des gens du Bangladesh, j'ai commencé à réfléchir aux questions de créativité, ainsi qu'aux biais de notre activité. J'ai pensé à ce que font les abeilles et ce que nous, les intellectuels, ne faisons pas. L'abeille fait de la pollinisation croisée ; nous gardons notre connaissance pour nous. Nous pratiquons cette pollinisation croisée au niveau global, mais pas local. Nous ne partageons pas nos découvertes avec les populations desquelles nous tirons nos données, nous ne les en remercions pas, nous ne partageons pas nos revenus avec elles, alors que leur travail est à la base de ces données. Pour corriger ces biais, j'ai lancé un nouveau réseau, et pendant les cinq premières années, j'ai investi mes revenus dans ce Honey Bee Network. Depuis, nous avons réuni plus de 100 000 idées, innovations et pratiques de connaissances traditionnelles.

Vous avez adopté le *shodh yatra*, que vous appelez « marche de recherche », ce qui signifie que vous guidez des étudiants et ceux qui le veulent à pied à travers tout le pays. Dans quel but ?

Ce processus qui fait appel à la marche (marche d'apprentissage, je dirais) est puissant, car il traduit notre authenticité. En hiver, nous nous rendons là où il fait froid ; en été, là où il fait chaud. Quand les températures sont de 47-48 °C dans un village, même si les gens ne travaillent pas par ce temps, ils se rendent compte que ceux qui viennent leur parler ne sont pas des touristes. Je me suis ainsi rendu avec d'autres volontaires du réseau HBN dans tous les États de l'Inde lors de trois marches par an. Deux d'entre elles sont ouvertes à tous, la troisième seulement aux étudiants. Cela fait plus de 6 000 km en vingt-cinq ans.

Des exemples de vos découvertes ?

Un jour, j'ai rencontré un fermier à qui j'ai expliqué pendant une bonne demi-heure pourquoi il ne fallait pas utiliser certains pesticides chimiques. C'est alors qu'il m'a dit : « *Professeur, j'ai compris.* »

“Avec des volontaires de Honey Bee Network, je suis allé dans tous les États de l'Inde, parcourant à pied 6 000 km en vingt-cinq ans”

Un catalogue d'innovations de terrain

« Il convient de faire la différence entre savoir traditionnel et innovations de terrain. Le premier recouvre une pratique qui a évolué au fil des expériences de la vie quotidienne des gens, et ce possiblement depuis longtemps. Alors que les secondes sont des innovations toutes nouvelles, développées pour la première fois en améliorant des solutions existantes, ou en modifiant les méthodes ou le matériel habituels. Nous en montrons de très nombreux exemples sur le site Internet du Gian (Grassroots Innovation Augmentation Network, www.gian.org), premier incubateur d'entreprises technologiques de l'Inde, qui se concentre sur l'incubation et la commercialisation de ces innovations de terrain, et qui a récompensé en décembre dix lauréats d'une compétition sur 87 pays (http://honeybee.org/HBNCRIIA-2020.php). On peut en découvrir des dizaines, qui vont de la moto-charrue au pulvérisateur à vélo, en passant par l'écapsuleuse de coton (pour les variétés de coton indigènes qui, contrairement au coton hybride, ne s'ouvrent pas complètement et donc nécessitent qu'on s'y attaque à la main, ce qui est long et laborieux) ou le grattoir pour arbre à gomme (qui empêche les femmes de se blesser gravement avec l'écorce des branches). Il y a même un gilet pare-balles (80 % d'ingrédients à base de plantes – protéines, soie et coton –, 20 % de préparations chimiques, en couches alternées). Les laboratoires indiens de la défense ont effectué des tests et les résultats ont été satisfaisants. Sur le même site, on peut trouver comment apporter de l'aide *« en ces temps de coronavirus »* et des vidéos montrent des solutions élaborées par diverses communautés. Notamment celles permettant d'assurer la distanciation physique et la sécurité sanitaire : d'un trombone glissé dans un briquet pour pousser les boutons dans l'ascenseur à l'ajout d'un morceau de métal au bas d'une porte, ce qui permet ainsi de l'ouvrir avec le pied et non à la main, en passant par le repassage d'un morceau de papier afin de neutraliser tout virus laissé dessus… » ■

▲ *La moto-charrue, engin spécialement adapté aux petites surfaces pour un moindre coût.*

Propos recueillis et traduits par D. J. L.

Quand je lui ai demandé de me préciser ce qu'il avait compris, il m'a répondu : *« Ces herbes que les animaux ne mangent pas sont une source potentielle de pesticides à base de plantes. De quoi a-t-on besoin pour contrôler les insectes ravageurs ? De toxicité. Et pourquoi le bétail ne mange-t-il pas ces plantes ? Parce qu'elles sont toxiques. Pourquoi ne pourrais-je pas fabriquer moi-même mes propres pesticides avec ces plantes ? »* Pour atteindre les objectifs (mondiaux) du développement durable (ODD) ou pour réduire la pollution de l'eau ou des sols, quelle réponse donner ? Si on évalue scientifiquement ce que disent les populations, la science pourra en bénéficier et les ODD seront atteints plus rapidement. Apportez une preuve scientifique que cela marche ou pas. Mais ne rejetez pas ces dires parce qu'ils se trouvent être abordables, durables et qu'ils peuvent être démocratiquement mis en œuvre par les populations elles-mêmes. Je peux vous citer un autre exemple. Il y a plusieurs années, j'ai découvert que les gens faisaient pousser de la coriandre autour de leurs pois chiches. Les paysans m'ont dit qu'elle repoussait les insectes nuisibles. Quand j'en ai informé l'entomologiste français Michel Pimbert *[aujourd'hui directeur du Centre d'agroécologie, eau et résilience à l'université de Coventry, au Royaume-Uni, NDLR]*, il a monté une expérience pendant trois ans et trouvé que la coriandre ne repoussait pas les insectes nuisibles, mais attirait leurs prédateurs. Les gens faisaient ce qu'il faut, mais pour de mauvaises raisons. Il y a un très grand nombre de solutions de ce genre dans la base de données du réseau Honey Bee Network. L'idée n'est pas de croire tout ce que dit telle ou telle personne, mais d'en faire l'évaluation et la validation. Et ensuite, lui donner de la valeur !

NIF

“Comment procéder pour enseigner en ligne à des enfants sans smartphone ?”

De quelle manière ?

Dans l’exemple des pesticides à base de plantes, vous pouvez imaginer en faire des nanoparticules qui pourraient être utilisées en très petites quantités. Elles élimineraient aussi bien les ravageurs et pourraient être dégradées plus vite dans l’environnement. Mixer la science moderne avec les connaissances de terrain validées peut donner d’excellents résultats. Je ne suis pas en train de vous parler de superstitions, de systèmes de croyance du genre qui ne peut être testé, mais de pratiques qui peuvent être réfutées et falsifiées *[selon les termes de la méthode scientifique, NDLR]*.

Cet automne 2020, justement, une controverse a fait du bruit en Inde, après une promesse de budget accru pour la médecine ayurvédique (fondée sur les herbes médicinales) et l’annonce de la création d’un centre de médecine traditionnelle par l’Organisation mondiale de la santé (OMS). Qu’en pensez-vous ?

La controverse vient du fait que la connaissance a été prise pour une croyance. Les scientifiques ont dit : faisons des expériences ! Menons des essais sur des patients prenant des stimulants immunitaires issus de la médecine ayurvédique. Faisons des essais correctement conçus, et apportons la preuve, si tel est le cas, que certaines hypothèses sont fausses. Pour ce qui est de la médecine, je ne veux pas que les connaissances de terrain soient traitées comme un placebo. Je veux qu’elles soient soumises à des expériences rigoureuses, du même type de test expérimental que celui effectué sur un nouveau médicament, un nouveau pesticide ou une nouvelle machine… Il ne devrait y avoir aucune concession, en termes de rigueur scientifique. Ce qui peut rendre la chose difficile *[dans la médecine ayurvédique, NDLR]*, c’est que de multiples ingrédients sont utilisés en même temps. Or, en science, on se concentre souvent sur une seule molécule à la fois. Si on a affaire à un cocktail de molécules, il y a donc de nombreuses cibles, ce qui nécessite une démarche de biologie systémique.

Vous avez également fondé la National Innovation Foundation (NIF). Qu’a-t-elle apporté de nouveau ?

Quand elle a été créée en 2000 à Ahmedabad, l’idée était qu’elle serve cinq objectifs : faire du repérage et créer de la documentation, valider et valoriser des idées, protéger la propriété intellectuelle (bien que plus de 90 % des idées soient en source ouverte). Puis, en 2003, fut monté le Fonds pour l’innovation des microentreprises, parce que des microcrédits sont nécessaires au développement d’idées innovantes pour lesquelles il y a un marché. Et ces fonds sont également essentiels pour soutenir les idées pour lesquelles le marché n’existe pas encore. Ce fut une réelle percée conceptuelle. Comment voulez-vous promouvoir de l’innovation de base sans capital-risque ? Le développement de bases de données et la dissémination de la connaissance font également partie des fonctions clés de la NIF. La plupart des pays ne disposent toujours pas d’une telle plateforme au sein de leur système

POUR EN SAVOIR PLUS

- **tinyurl.com/yadpx73u**
« Les foyers secrets de l’invention en Inde », conférence TED donnée par Anil K. Gupta (en anglais, sous-titrée en français).
- **www.gian.org**
Le site Internet du Grassroots Innovation Augmentation Network (Gian), premier incubateur d’entreprises technologiques de l’Inde.
- **www.honeybee.org/**
Le site Internet du réseau Honey Bee Network.
- **www.sristi.org/**
Le site de la Society for Research and Initiatives for Sustainable Technologies and Institutions.
- **http://nif.org.in**
Le site de la National Innovation Foundation indienne.

JOERG BOETHLING / ALAMY STOCK PHOTO/ PHOTO 12

d'innovation national pour inclure ce secteur informel (public et privé). Certains l'appellent « science citoyenne », « innovation bottom-up » (ascendante), « innovation locale ». En Inde, nous l'avons instaurée en 2000 et j'oserais dire qu'a ainsi été accomplie une rupture majeure, d'un point de vue politique et institutionnel, avec l'isolement du système de recherche et développement (R&D) vis-à-vis de la connaissance informelle populaire.

Pour quels résultats ?

La NIF dispose d'une base de données de 315 000 idées technologiques et a déposé 1 200 brevets, dont huit aux États-Unis (trois d'entre eux sur des machines, déposés en 2003 par Sristi et Gian). Il était important d'apporter la preuve qu'un innovateur de terrain peut repousser les frontières techniques jusque dans un pays réputé pour la rigueur de son système de droits de la propriété intellectuelle. L'un de nos brevets concerne un médicament contre la typhoïde à base de plantes.

À l'international, le budget indien de R&D est jugé bas, 0,7 % du produit intérieur brut, même si un soutien aux technologies quantiques (900 millions d'euros sur cinq ans) a été annoncé récemment. Qu'en pensez-vous ?

Le budget est une question très sérieuse, sachant que plusieurs Premiers ministres par le passé, dans leur discours au congrès scientifique, ont déclaré qu'ils souhaiteraient qu'il atteigne 2 %. Le fait est qu'il n'est pas à ce niveau, pas même à 1 %. La science stratégique, l'espace et d'autres domaines comme le quantique reçoivent un soutien, à juste titre. Mais j'aurais personnellement souhaité beaucoup plus de subventions pour des sciences et des technologies inclusives donnant des solutions abordables. Tout particulièrement en faveur des femmes. Des millions d'entre elles assument de très nombreuses corvées dans leur vie quotidienne. Elles continuent de faire cuire les aliments selon une méthode ancestrale, avec un poêle à bois de chauffage entièrement ouvert, où seulement 15 % de l'énergie produite est restituée. Cela les oblige également à de longues marches pour ramasser du bois de chauffage, qui cause une pollution excessive de l'air à l'intérieur des habitations. Des millions de femmes transplantent le riz à la main, avec une posture de flexion du dos plutôt douloureuse. Une bonne machine manuelle à transplanter serait nécessaire. En général, on peut constater que l'évolution des technologies est plus lente à résoudre les problèmes auxquels les femmes sont confrontées. C'est vrai dans le monde entier, et certainement en Inde. Avec un petit budget de R&D, ce sont les pauvres qui souffrent plus que la moyenne, voilà le problème. Pire, lorsqu'il y a convergence entre le marché et l'État, les solutions ont tendance à les exclure. Exemple type : près de 1 milliard de personnes disposent d'un téléphone, à proprement parler. Mais seulement 25 % ont un smartphone. Alors, lorsque vous avez un enseignement en ligne, comment procédez-vous avec les enfants sans smartphone ?

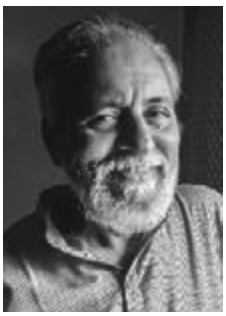
Que peuvent faire les scientifiques ?

Ils peuvent accumuler des données, les analyser et aider à comprendre ce qui se passe. Pour que les dirigeants politiques puissent réagir. Je vais vous donner un exemple. En 1989, j'ai écrit un article, « Pourquoi les régions riches en biodiversité sont-elles si pauvres » ? Puis, en 2004, l'ONU a publié une carte mondiale des régions où les enfants présentaient un retard de croissance élevé, apparemment pour cause de malnutrition. Ils ont constaté que la proportion d'enfants malnutris était très élevée dans les régions à forte biodiversité dans de nombreux endroits du monde. Pourquoi ? Parce que, lorsque le marché ne peut pas faire face à des productions diverses, à des compétences diverses, à des ressources diverses, les possibilités d'emploi sont limitées. D'où la pauvreté. Oui, nous pouvons fournir ces preuves et attirer l'attention des décideurs sur ces régions.

L'Inde oscille entre le 3e et le 4e rang en nombre de doctorats décernés en sciences et ingénierie, après les États-Unis, la Chine et le Royaume-Uni. Qu'est-ce que ce chiffre dit de l'éducation ?

Notre système d'enseignement supérieur reste compétitif à l'échelle mondiale, mais notre système d'éducation scolaire est très faible. En ce qui concerne l'enseignement supérieur, nous n'avons pas fait aussi bien que la Chine, mais c'est raisonnable. Reste que le nombre de nos brevets ou de nos doctorats par rapport à la Chine est bien moindre. Chez eux, les publications dans les revues de rang A (*) y sont bien plus nombreuses que chez nous. Nous devons encore améliorer nos performances.

(*) Une revue de rang A, ou qualifiante, se rattache à des revues particulières dont les publications sont un indicateur de reconnaissance et de visibilité à l'intérieur d'un champ disciplinaire.



Le programme spatial indien est très ambitieux. Vous avez déclaré qu'il faisait appel à des solutions frugales, que vous prônez. Que vouliez-vous dire ?

Le programme spatial indien est un bon exemple de frugalité, ce qui signifie un faible coût pour une efficacité élevée. La mission lunaire *[une troisième mission avec lander et rover a été lancée début 2021 après un échec d'une mission précédente fin 2019, NDLR]* a coûté environ 78 millions de dollars. On savait que personne au monde n'était capable de mener une mission vers la Lune ou vers Mars pour moins de 1 milliard de dollars. Alors, que pouvions-nous faire ? Parce que les Indiens sont très bons en mathématiques, des simulations ont pu être mises au point. Celles des lancements passés étaient si précises que nos scientifiques pouvaient décider d'abandonner la mission en un centième de seconde, s'ils trouvaient une faille. Nous avons donc réussi beaucoup de lancements sans avoir mené autant de tests coûteux que les autres pays. Notre système est très efficace et nous avons été capables de mettre en orbite plus d'une centaine de nanosatellites en un seul lancement, en 2017. Cela montre la force de nos ingénieurs, sans doute pas avec des formations de très haut niveau *[comme le titre d'ingénieur en France, NDLR]*, mais qui travaillent très dur pour un programme de haute technologie, grâce à un bon leadership. Cela fait des merveilles.

Que pensez-vous du dernier prix Nobel de chimie pour CRISPR-Cas9, reçu par l'Américaine Jennifer Doudna et la Française Emmanuelle Charpentier, qui travaille à Berlin ?

L'un des outils de diagnostic indien du Covid-19 sorti récemment, appelé « Feluda » *[du nom d'un célèbre détective de fiction indien, NDLR]*, se fonde sur cette technique. C'est un exemple remarquable, obtenu par l'Institut de génomique et biologie intégrative basé à Delhi, d'utilisation de la technologie CRISPR, pour rendre les tests plus simples, plus abordables (moins de 11 euros) et plus rapides (résultat en moins d'une heure). Il ne nécessite pas de coûteuses machines RT-PCR et rend les tests accessibles à un grand nombre de laboratoires. Je rends hommage aux lauréates du prix Nobel, qui n'avaient peut-être pas imaginé cette application spécifique de leur technologie, et à nos scientifiques qui l'ont utilisée pour trouver une solution. La bonne science aide toujours. Ces scientifiques ont mis leur technologie à disposition des autres et nous avons pu en faire usage.

Vous avez pris votre retraite de l'Institut indien de management d'Ahmedabad en 2017. En votre honneur, deux points d'eau potable ont été construits à l'extérieur de l'institut, *« non seulement pour étancher la soif des passants, mais aussi la soif d'innovation »*, avez-vous déclaré. Est-ce un résumé de votre idéal ?

Deux jours avant que je ne prenne ma retraite, Ashish Nanda, le directeur de l'époque, l'un de mes anciens étudiants, professeur à l'université Harvard, m'a demandé si je souhaitais quelque chose avant de partir. J'ai dit que oui, mon cœur souffrait de ce que beaucoup de gens viennent à notre institut pour apporter des lettres, livrer des colis, passent devant nos bâtiments et n'aient nulle part où trouver à boire une bonne eau fraîche. Deux jours plus tard, il avait fait faire ces points d'eau. Cela me touche, car beaucoup de gens n'ont pas les moyens d'acheter une bouteille d'eau potable et, dans notre pays, 60 % des maladies sont liées à une mauvaise qualité de l'eau. Alors, oui, je suis très fier que mon institution ait pu honorer mon souhait. Je crois qu'il faut lutter pour que la science soit un bien commun, que les intellectuels servent l'intérêt public, que la connaissance soit un bien public, car c'est là-dessus qu'une société démocratique devrait s'appuyer. ■

Propos recueillis et traduits par Dominique Leglu

“Le programme spatial indien est un bon exemple de frugalité”

ANAMIKA DEY

DISPONIBLE EN APPLICATION MOBILE

LINKINNOV

La plateforme digitale dédiée à l'innovation et à l'Expertise Scientifique

Chercheur.euse, votre expertise a de la valeur !

Les sciences et l'innovation technologique façonneront les réponses aux défis sociétaux et environnementaux majeurs actuels et à venir.

Plateforme digitale française de l'innovation, Linkinnov connecte SIMPLEMENT et RAPIDEMENT l'expertise scientifique et les entreprises innovantes pour leur permettre de construire ensemble des projets porteurs de sens.

Linkinnov dispose d'un moteur de recherche puissant permettant d'accéder à des contenus ciblés et à un écosystème d'entreprises innovantes.

Chercheurs académiques, doctorants, post-doctorants :

- **Valorisez votre savoir-faire à travers des missions d'expertise**
- **Faites-vous recruter au sein d'entreprises innovantes**
- **Identifiez des applications concrètes à vos recherches**
- **Trouvez les bons partenaires pour votre projet**

Aujourd'hui Linkinnov vous propose :

La publication d'annonces - Trouvez des partenaires pour des projets collaboratifs, identifier les soutiens et relais nécessaires à la construction de votre projet start-up.

Les notifications ciblées - Un algorithme analyse les mots-clés indiqués dans les annonces et les fait correspondre aux mots-clés renseignés dans votre profil. Si y a une correspondance vous aurez la possibilité de recevoir un e-mail vous invitant à vous rendre sur l'annonce.

La publication en mode anonyme - Linkinnov garantit la confidentialité de vos recherches grâce à cette fonctionnalité qui vous permet de publier une annonce en mode anonyme.

La jauge profil - Plus votre profil est complété plus il sera visible dans les résultats du moteur de recherche*. La jauge vous donne un repère sur le niveau atteint et les compléments à apporter.
** Engagement de transparence : vos données ne sont ni revendues, ni utilisées à des fins commerciales*

Un format multilingue - Linkinnov est disponible en français, anglais, italien, allemand et espagnol.

L'import des publications depuis HAL / Espacenet - Vous pouvez rapidement compléter votre profil Linkinnov en important vos articles scientifiques depuis HAL et vos brevets depuis Espacenet.

L'export de posts vers LinkedIn, Facebook et WhatsApp - Un post vous intéresse, envie de le partager à votre réseau hors de la plateforme ? C'est possible en cliquant sur le bouton de partage en bas de chaque publication.

DÉCOUVRIR LINKINNOV

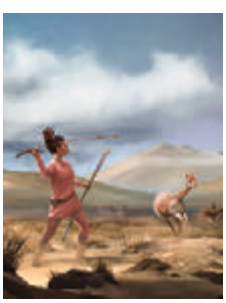
Inscriptions : www.linkinnov.com
Contact : connect@linkinnov.com

cnrs Inserm Université de Paris Université Gustave Eiffel Université Paris-Est bpifrance Île-de-France

LES TEMPS FORTS

▲ 14 octobre
Tardigrades et radiations

▲ 20 octobre
Sonde Osiris-Rex



▲ 4 novembre
Chasseuses andines

▲ 27 Novembre
Écriture élamite

Sondes spatiales américaine, chinoise et japonaise, écriture datant de plus de 5000 ans déchiffrée en Iran, préparation à la 6G en Europe: retrouvez en quelques dates l'actualité scientifique de ces derniers mois.

14 OCTOBRE

Une équipe indienne met en évidence une nouvelle propriété des tardigrades. Ces animaux microscopiques, en plus de survivre aux conditions les plus extrêmes, seraient en mesure de résister à des radiations UV.

S. Harikumar *et al., Biol. Lett.,* doi:10.1098/rsbl.2020.0391, 2020.

20 OCTOBRE

La sonde américaine Osiris-Rex arrive au terme de la première étape de sa mission. Elle a collecté au moins 400 g de roches sur l'astéroïde Bennu à 330 millions de km de la Terre. Son retour sur Terre est prévu pour 2023 et devrait aider à comprendre l'origine du Système solaire.

tinyurl.com/osiris-rex-sonde

4 NOVEMBRE

Des archéologues ont mis au jour, dans les Andes péruviennes, des restes de femmes gisant avec leurs armes de jet : ces femmes étaient des chasseuses ! Selon les spécialistes, elles représentaient entre 30 et 50 % des personnes s'adonnant à cette activité, qui n'était donc pas l'apanage des hommes.

R. Haas *et al., Sci. Adv., 6,* eabd0310, 2020.

11 NOVEMBRE

Le budget européen alloué à la recherche et à l'innovation pour les sept années à venir est adopté. Il sera de 85 milliards d'euros, au lieu des 94,4 milliards initialement prévus.

tinyurl.com/RandD-UE-budget

23 NOVEMBRE

▶ L'Agence européenne pour l'environnement annonce une nette amélioration de la qualité de l'air en Europe ces dix dernières années. En 2018, le nombre de décès liés à la pollution atmosphérique était de 13 % inférieur à 2019.

tinyurl.com/aee-pollution-atmospherique

▶ Le lanceur chinois Longue Marche 5 met sur orbite la sonde Chang'e 5. Celle-ci est partie en direction de la Lune pour une mission d'échantillonnage express du sol de notre satellite. Après une collecte fructueuse (environ 2 kg), la capsule contenant les échantillons est revenue sur Terre le 16 décembre.

tinyurl.com/change-e-5

27 NOVEMBRE

Le magazine *Sciences et Avenir-La Recherche* révèle que François Desset, archéologue français, a déchiffré des écritures en proto-élamite et élamite (vers -3300 av. J.-C.) en Iran. Cette découverte remet en cause l'existence d'un berceau unique de l'écriture au Proche-Orient comme les chercheurs le pensaient jusqu'alors.

tinyurl.com/apparition-ecriture

30 NOVEMBRE

L'intelligence artificielle AlphaFold de Google DeepMind remporte, haut la main, le concours CASP de prédiction de structure 3D des protéines. C'est la première IA à prédire la structure de protéines avec une précision quasiment égale à celle atteinte lors d'expériences en laboratoire.

tinyurl.com/alphafold-google

4 DÉCEMBRE

La Chine démarre avec succès son réacteur expérimental à fusion nucléaire, le tokamak HL-2M. Le pays est en tête dans la quête de cette énergie issue de la fusion de l'hydrogène.

tinyurl.com/fusion-nucleaire-chine

5 DÉCEMBRE

La capsule de la sonde japonaise Hayabusa 2 rapporte sur Terre 5,4 g de grains de l'astéroïde carboné Ryugu. Une première mondiale.

tinyurl.com/mission-hayabusa-2

8 DÉCEMBRE

La société pharmaceutique britannique AstraZeneca devient la première à voir ses recherches de vaccin contre le SARS-CoV 2 validées par une revue scientifique. Publiés dans *The Lancet,* les essais ont porté sur 11 636 volontaires britanniques et brésiliens, majoritairement âgés de 18 à 55 ans (87,8 %), blancs (82,7 %) et de sexe féminin (60,5 %). Le vaccin serait efficace à 70 %. Un chiffre à mettre en perspective avec les résultats annoncés – qui seront publiés le 10 décembre –

ALICE ABELA - NASA'S GODDARD SPACE FLIGHT CENTER - MATTHEW VERDOLIVO, UC DAVIS IET ACADEMIC TECHNOLOGY SERVICES - FRANÇOIS DESSET

de ses concurrents directs, l'américain Moderna et l'association américano-allemande Pfizer-BioNTech. Tous deux déclarent des efficacités avoisinant les 90 %.
Le vaccin du français Sanofi est, quant à lui, est retardé pour cause de sous-efficacité chez les sujets de plus de 50 ans.
tinyurl.com/the-lancet-astrazeneca

10 DÉCEMBRE

L'Union internationale pour la conservation de la nature inscrit 3 000 nouvelles espèces sur la liste des animaux et végétaux en danger. À ce jour, celle-ci compte près de 129 000 espèces, dont 35 765 menacées d'extinction.
/tinyurl.com/uicn-rapport

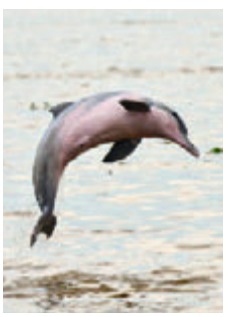
24 DÉCEMBRE

La Loi de programmation pluriannuelle de la recherche pour la période 2021-2030 est promulguée, un mois après son adoption finale par l'Assemblée nationale et le Sénat.
tinyurl.com/la-lppr-vote

1ER JANVIER 2021

Nokia et l'Europe se lancent dans la 6G. La firme finlandaise prend les commandes d'Hexa-X, consortium réunissant laboratoires de recherche et entreprises de télécommunication. Sous l'égide de la Commission européenne et pour une durée de deux ans et demi, ce groupe de recherche aura pour but de penser et développer l'Internet mobile de demain.
tinyurl.com/europe-et-6G

▲ 5 décembre
Sonde Hayabusa 2



▲ 10 décembre
Espèces en danger

À NOTER

FÉVRIER 2021 TROIS MISSIONS ARRIVENT SUR MARS : LA SONDE ÉMIRATIE EMM OUVRIRA LE BAL LE **9 FÉVRIER** ET COMMENCERA SES OBSERVATIONS MÉTÉOROLOGIQUES. LE **11 FÉVRIER,** LA SONDE CHINOISE TIANWEN-1 DEVRAIT LARGUER UN ATTERRISSEUR ET UN ROVER SUR LE SOL DE LA PLANÈTE ROUGE ; SA MISSION SERA D'ANALYSER LES STRUCTURES INTERNES DE MARS AINSI QUE SON ATMOSPHÈRE. ENFIN, LE **18 FÉVRIER,** LE ROVER PERSEVERANCE DE LA NASA AMARSIRA DANS LE CRATÈRE DE JEZERO AVEC POUR OBJECTIF PRINCIPAL D'Y TROUVER DES PREUVES D'UNE ANCIENNE VIE MICROBIENNE.
www.emiratesmarsmission.ae
https://mars.nasa.gov/mars2020

JAXA-FIG8B - TRUJILLO - DR

TWEET

Outre le Covid-19, l'effondrement du célèbre radiotélescope Arecibo à Porto-Rico et l'événement climatique La Niña, d'une ampleur majeure dans le Pacifique Sud, ont nourri les débats.

La Station spatiale internationale (@ISS_Research) a proposé, pour fêter ses 20 ans, un fil qui retrace deux décennies d'expériences menées en orbite, à travers nombre de photos et de vidéos.
tinyurl.com/20-ans-iss

Cédric Paternotte (@cedric_p), *philosophe et maître de conférences à la Sorbonne* fait des recommandations pour celles et ceux qui souhaiteraient mettre un pied dans la philosophie des sciences. *« La philosophie des sciences vous intéresse mais vous ne savez pas par où commencer (à part en suivant ces fils) ? Quels ouvrages sont de bonnes introductions ? C'est notre nouveau #FilPhiloSciences »*
tinyurl.com/c-paternotte-philo-sciences

Didier Queloz (@DidierQueloz), *astronome et Prix Nobel de physique 2019* a réagi, le 19 novembre, à l'annonce de l'arrêt définitif du radio télescope Arecibo qui, endommagé, menaçait alors de s'effondrer : *« Merci pour toutes ces merveilles de l'Univers que nous avons découvertes et pour cette scène mémorable de James Bond. »* Quelques jours plus tard, le 1er décembre, la rupture de deux câbles majeurs entraînera la destruction définitive de la structure.
tinyurl.com/didier-queloz-arecibo

Christophe Cassou (@cassouman40), *climatologue, directeur de recherche au CNRS* a partagé, le 10 décembre, un fil au sujet du phénomène climatique La Niña, qui impacte périodiquement le Pacifique Sud. *« En cette fin 2020, le Pacifique est dominé sur l'équateur et le long des côtes d'Amérique du Sud par des conditions bien plus froides que la normale. Phénomène naturel appelé #LaNina. L'événement en cours est majeur, les derniers en date remontant à 2010-2011 et 1998-1999. »*
tinyurl.com/christophe-cassou-la-nina

Vittoria Colizza (@vcolizza), *spécialiste en modélisation des maladies infectieuses à l'Inserm* et son équipe, dans une grosse étude mise en ligne le 21 décembre, ont *« constaté qu'environ 90 000 cas symptomatiques de Covid-19, correspondant à 9 cas sur 10, n'ont pas été détectés par le système de surveillance*

après le premier confinement [en France] ». « La stratégie de dépistage doit être une fois de plus la pierre angulaire de notre réponse de santé publique contre le Covid-19. », insiste-t-elle sur Twitter.
G. Pullano *et al., Nature*, doi:10.1038/s41586-020-03095-6, 2020.

L'ALCHIMIE DU VIVANT

L'enquête se révèle ardue : après la formation de la Terre, il y a 4,56 milliards d'années, la croûte originelle de notre planète a été détruite par les impacts d'astres extraterrestres et par la tectonique des plaques. Dès lors, trouver les premiers indices de vie est impossible. Et il faut s'y résoudre : les reliques les plus anciennes auxquelles nous avons accès aujourd'hui ne sont pas celles de la première vie apparue sur Terre. Pour autant, elles nous en apprennent beaucoup ! Tout comme l'analyse des astéroïdes et des comètes qui, en la heurtant, auraient apporté sur notre planète les éléments nécessaires et constitutifs du vivant. Mais par quelle chimie, dans une mare chaude de cette Terre primitive, ou aux fonds des mers, la vie a-t-elle émergé à partir de ces molécules ? Quels furent les premiers organismes que l'on peut qualifier de vivants ? Sur cette question fondamentale, les chercheurs progressent pas à pas dans une aventure scientifique de plus en plus interdisciplinaire – des mathématiques à la biologie, sans oublier l'intelligence artificielle.

SURANGAW/ GETTY IMAGES

◀ *La vie a pu apparaître à partir d'éléments primordiaux dans un environnement physico-chimique particulier, analogue à la source chaude Grand Prismatic Spring, située dans le parc national de Yellowstone, aux États-Unis.*

« *Comment la physique et la chimie peuvent-elles rendre compte des événements qui se déroulent dans l'espace et dans le temps à l'intérieur même des frontières d'un organisme vivant ?* » Cette question, posée en 1944 par l'un des pionniers de la physique quantique, Erwin Schrödinger, guide aujourd'hui encore les scientifiques. Qu'est-ce qui a été compris depuis cette époque ? Une date marque les esprits : 1953. Cette année-là, les expériences du biologiste américain Stanley Miller permettent d'obtenir des acides aminés à partir du méthane. Elles établissent ainsi une continuité entre la chimie organique – à base de carbone – et la chimie du vivant. Les acides aminés jouent en effet un rôle central dans la structure, le métabolisme, la physiologie des cellules de tous les êtres vivants. La même année, deux autres biologistes, l'Américain James Watson et le Britannique Francis Crick frappent un coup décisif. Ils décrivent la structure de l'ADN, porteuse de l'information génétique propre à chaque être vivant.

Un organisme vivant peut être défini comme un système chimique capable de régénérer ses propres constituants, d'échanger matière et énergie avec son environnement, de se reproduire plus ou moins parfaitement – et donc d'évoluer –, le tout fondé sur la chimie du carbone. Pourquoi le carbone ? Car cet élément chimique possède des propriétés uniques permettant une stabilité des molécules et une chimie d'une richesse loin d'avoir encore été complètement explorée.

Autre question cruciale : existe-t-il un plus petit dénominateur commun à ce vivant terrestre ? Serait-ce la cellule ? Serait-ce l'ADN, cette suite de longues chaînes carbonées composées de quatre désoxyribonucléotides enchâssés (voir le schéma p. 19) ? Ou alors l'ARN, un acide nucléique assez proche de l'ADN, qui sert de support intermédiaire pour la synthèse des protéines ? Toujours est-il que tous les organismes sont composés de ces molécules organiques plus ou moins complexes dont la combinatoire des réactions aboutit à l'intégralité du vivant. Rappelons que les chercheurs ont à ce jour recensé tout au plus à peine 20 % des organismes terrestres !

Dès lors, l'enquête sur les origines ne peut s'affranchir de la recherche de ces premières traces de vie microbienne à la surface du globe. Et pour trouver des fossiles de ces organismes primitifs, il faut les dénicher sous nos pieds, dans des roches anciennes formées il y a presque 4 milliards d'années – soit environ 560 millions d'années après les origines de la Terre – et qui affleurent encore par endroits (lire p. 32). Mais il faut aussi regarder vers le ciel ! Car il ne fait plus aucun doute aujourd'hui que des réactions chimiques complexes se produisent dans l'espace, comme en témoigne la multitude de molécules organiques que l'on y retrouve, que cela soit dans le milieu interstellaire, les comètes ou même les astéroïdes. Raison pour laquelle les quelques grammes de grains et de poussières rapportés sur Terre en décembre par une capsule de la sonde japonaise Hayabusa 2 et récoltés sur l'astéroïde carboné Ryugu sont un trésor ! Constitués de matériau primitif du Système solaire, ils vont être analysés en

Des composés inorganiques auraient pu donner naissance aux premiers métabolismes

détail dans les mois à venir et de nombreuses autres missions de retour d'échantillons sont également en cours (lire p. 40).

Sous nos pieds, au-dessus de nos têtes… L'enquête se déroule aussi en laboratoire, où les scientifiques tentent de reproduire l'expérience fondatrice de l'exobiologie que Miller a menée en 1953, popularisant la notion de soupe primordiale. En voici la recette : prenez un mélange de composés organiques simples, ajoutez de l'énergie, et vous obtiendrez des réactions chimiques produisant des molécules constitutives du vivant. Facile ? Non, car encore faut-il savoir quels sont les milieux et les conditions physico-chimiques qui ont pu engendrer ces premières briques du vivant. Un peu comme un cuisinier qui doit connaître le contenant adéquat, la température et le temps de cuisson. Or il n'y a pas de consensus sur ce point et beaucoup de milieux sont explorés. De plus en plus de chimistes estiment cependant que les sources hydrothermales des océans sont de bonnes candidates. D'où des expériences en cours pour analyser les composés chimiques qui y seraient synthétisés (lire p. 48). Las ! Pour le moment, il n'a pas encore été possible de reconstituer les molécules d'ARN primitif constituant un monde vivant, capable de fournir à la fois un plan de montage des cellules et les outils catalytiques qui précèdent la vie cellulaire.

L'ARN, PRÉCURSEUR DE L'ADN ?

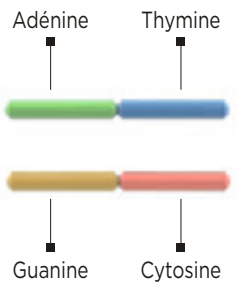
Pendant que les chimistes cuisinent, les biologistes, eux, portent leurs recherches sur les premières cellules. A-t-il existé un ancêtre commun à toutes les cellules vivantes, ancêtre qu'ils ont nommé Luca (pour « Last Universal Common Ancestor ») ? Bien que, hypothétique, il soit à jamais inaccessible – car il remonterait à une époque dont il ne reste aucun vestige –, il ne faut pas désespérer ! L'étude phylogénétique des différents types de cellules actuelles permet en effet de proposer des scénarios évolutifs des premiers organismes unicellulaires. Elle établit ainsi un lien entre les premières cellules procaryotes (sans noyau), eucaryotes (avec noyau) et les archées (lire p. 36).

Remontant encore plus loin dans le temps, avant Luca, les chimistes, quant à eux, estiment que l'ARN pourrait être le précurseur de toutes les molécules biologiques, notamment l'ADN et les protéines. Dans cette hypothèse, cette longue molécule apparaît comme la première forme de vie avant l'émergence d'une cellule à ADN. Si aujourd'hui l'ARN est à la fois catalyseur des réactions chimiques et le support de l'information génétique, ce rôle aurait pu être tenu autrefois par autre chose : des métaux ou des minéraux disponibles dans l'environnement de la Terre primitive. Dès lors, ce sont ces composés inorganiques qui auraient donné naissance aux premiers métabolismes avant même l'apparition des molécules complexes comme l'ARN (lire p. 52).

Cette quête, démarrée il y a presque trois quarts de siècle, est loin d'être terminée. Le mystère de l'origine du vivant reste ouvert. La combinatoire des réactions physico-chimiques et biochimiques est tellement vaste que, sans connaître les conditions initiales précises, le champ des possibles est si grand que les scénarios d'apparition du vivant sont multiples. Mais à mesure que les scientifiques avancent, l'étau se resserre sur les plus probables et il est à gager que l'on parviendra à répondre à la question du fonctionnement posée par Schrödinger tout comme à celle de l'origine qui lui est liée. Après tout, à l'échelle de la méthode scientifique, cette question est relativement nouvelle. Les choses avancent : soyons patients. ■

Philippe Pajot

BRUNO BOURGEOIS



L'ADN, MOLÉCULE ENROULÉE

Cette macromolécule commune au monde vivant est constituée de deux brins liés par des bases azotées complémentaires (adénine-thymine et guanine-cytosine).

Christophe Malaterre
PHILOSOPHE
DES SCIENCES

Marie-Christine Maurel
BIOLOGISTE
ET BIOCHIMISTE

UQAM - ERIC GARAULT / PASCO

Entretien avec **Christophe Malaterre** et **Marie-Christine Maurel**

« Une question qui stimule l'imagination et l'intelligence »

Les cellules sont-elles apparues dans une petite mare chaude, comme le pensait Charles Darwin, ou près des sources hydrothermales volcaniques des fosses océaniques ? La vie est-elle venue de l'espace ? Comment les scientifiques établissent-ils des scénarios de l'apparition du vivant ? Regards croisés avec Christophe Malaterre, professeur de philosophie des sciences à l'université du Québec à Montréal, et Marie-Christine Maurel, professeure de biologie et de biochimie à Sorbonne Université et au Muséum national d'histoire naturelle.

La Recherche **Pendant longtemps, la question de l'origine du vivant est restée de nature mythologique ou religieuse. Comment la science s'est-elle emparée de cette question ?**

Christophe Malaterre L'humain a une propension à créer des mythes. On retrouve des discours sur l'origine, la genèse du monde, chez de nombreux peuples. Nous, Européens, qui baignons dans la culture judéo-chrétienne, nous avons le mythe de la Genèse issu de la Bible, mais il existait des récits sur des dieux créant les êtres humains – et le monde qui va avec – bien avant cela. Dans tous ces discours mythologiques, il y a une instantanéité flagrante dans ces créations. On passe soudainement d'un état sans vie à un état vivant. Cette discussion a particulièrement agité la communauté scientifique au XIXe siècle, lors du débat sur la génération spontanée, avec la fameuse expérience de Louis Pasteur. À cette époque-là, on est encore dans le paradigme selon lequel la vie apparaît de l'inerte de manière spontanée. Mais Pasteur établit que cela ne fonctionne pas : ce genre d'émergence spontanée d'organismes vivants, même microscopiques, à partir de matière organique inerte, ne peut pas se faire.

Marie-Christine Maurel Le rôle de la Terre comme berceau du vivant est déjà omniprésent dans la plupart des mythologies. Prenons la *Théogonie* du poète grec Hésiode (VIIIe-VIIe siècles avant notre ère), l'un des premiers poèmes sur les origines. La question de la formation de la vie y est posée en des termes extrêmement modernes puisqu'Hésiode parle de la Terre *« féconde »* : au début, il y avait la Terre, qui a peu à peu enfanté le ciel, puis la vie. Aujourd'hui, les travaux expérimentaux sur les origines de la vie – et non pas l'origine de la vie – sont de plus en plus en rapport avec le rôle des surfaces minérales, la géochimie, les sciences écologiques… Cela montre une certaine continuité dans l'esprit humain et dans la recherche des origines. Car, s'il n'y a pas de génération spontanée de la vie, il n'y a pas non plus de génération spontanée des idées. L'esprit humain avance pas à pas et repense sans cesse ce qui a été insuffisamment pensé. Pasteur a eu l'intelligence de refaire des travaux qui avaient été faits avant lui, en particulier par les biologistes italiens Francesco Redi et Lazzaro Spallanzani. Les idées « nouvelles » proviennent d'idées qui n'ont pas été assez explorées.

En quoi le XIXe siècle est-il un tournant ?

C. M. Le référentiel temporel change. La découverte de fossiles, dont on n'imaginait pas l'existence, fait prendre conscience que la planète sur laquelle nous vivons a un âge beaucoup plus grand que celui qu'on lui attribuait. Ces traces de vie remontent bien plus loin que ce que l'on n'avait jamais osé envisager ! La question des origines de la vie bénéficie de cette nouvelle mise en contexte, très fertile, qui va permettre à d'autres scientifiques, au début du XXe siècle, de réfléchir en des termes véritablement empiriques. On assiste alors aux balbutiements d'expériences autour d'hypothèses, comme celle de la « soupe primitive » proposée par le Soviétique Alexandre Oparine, puis le Britannique John B. S. Haldane, dans les années 1920. Puis ces idées se sont déployées et ont permis à d'autres chercheurs d'approfondir la question et de la décliner dans un contexte expérimental de plus en plus précis.

M.-C. M. Au XIXe siècle, il faut souligner les premières expériences de laboratoire, telles que la synthèse de l'urée (1828) et des sucres (1861). Pour la première fois, des scientifiques qui ne s'intéressaient pas aux origines de la vie obtiennent des résultats déterminants dans ce domaine, comme ceux obtenus par le chimiste allemand Friedrich Wöhler. Celui-ci parvient à obtenir de l'urée, une substance organique, à partir de cyanate d'ammonium, une substance inorganique. Ces travaux mettent en évidence le lien entre l'inorganique (le minéral) et l'organique. C'est aussi à cette époque que Jean-Baptiste Lamarck, dans *Philosophie zoologique* (1809), avance pour la première fois l'hypothèse d'une origine physico-chimique de la vie. Et cela bien avant Charles Darwin, qui parlera ensuite de petites mares chaudes dans lesquelles il y aurait eu des sels d'ammoniac, des phosphates… puis de la vie.

Ces démarches scientifiques ne se développent-elles pas grâce à un contexte culturel et politique favorable ?

C. M. Oui, au XIXe siècle, on commence à oser s'affranchir de la religion. La Révolution

BIO

Marie-Christine Maurel

- **1994** Elle reçoit l'habilitation à diriger des recherches de l'université Pierre-et-Marie-Curie, Paris 6.
- **1997** Elle est professeure à l'université Pierre-et-Marie-Curie, Paris 6, titulaire de la chaire Origines de la vie et évolution moléculaire.
- **1999** Elle obtient un DEA de philosophie des sciences à l'université Paris 1.
- **2007** Elle devient directrice du laboratoire acides nucléiques et biophysique (Anbiophy) (CNRS, université Pierre-et-Marie-Curie).
- **2014** Elle est distinguée Fellow de l'International Society for the Study of the Origin of Life (Issol).

Christophe Malaterre

- **1991** Il est diplômé de l'École centrale de Paris.
- **1993** Il obtient un master de science en technologie et politique publique au Massachusetts Institute of Technology, aux États-Unis.
- **2008** Il obtient un doctorat en philosophie à l'université Paris 1.
- **2009** Il reçoit le Prix de la chancellerie des universités de Paris.
- **2010** Il reçoit le prix « jeune chercheur » de la Société de philosophie des sciences.
- **2016** Il occupe la chaire de recherche du Canada en philosophie des sciences de la vie à l'université du Québec à Montréal.

française et les idées philosophiques des Lumières, au XVIIIe siècle, ont ouvert des brèches. Pour autant, même le débat entre Pasteur et Félix Pouchet sur la génération spontanée s'inscrit dans un contexte empreint de présupposés théologiques. Le facteur religieux n'est en réalité pas du tout évacué. Aujourd'hui encore, nous n'en sommes pas totalement affranchis, qu'il s'agisse de la connaissance scientifique en général ou de la question des origines de la vie en particulier.

M.-C. M. Nous en avons l'illustration avec deux anciens présidents des États-Unis, Ronald Reagan dans les années 1980, et Donald Trump ces dernières années, pour lesquels la théorie de l'évolution n'est qu'une hypothèse parmi d'autres. Ces soutiens au plus haut niveau du pouvoir ont conduit à l'instauration, dans certains États américains, de l'enseignement du créationnisme *[ou du « dessein intelligent », sa version parée d'oripeaux scientifiques, NDLR]*, élevé au même rang que la théorie de l'évolution ! Cette position créationniste est donc encore, hélas, très actuelle.

> **“ Il faut affiner notre manière de définir le vivant, les fonctions qu'on lui attribue ”**
>
> **Christophe Malaterre**

Quelles sont les expériences les plus marquantes du XXe siècle qui ont orienté les recherches actuelles ?

M.-C. M. L'expérience de l'Américain Stanley Miller, en 1953, a été fondatrice de tout ce qui se fait aujourd'hui en chimie prébiotique. Ce biochimiste a essayé de reconstituer les conditions de l'atmosphère primitive dans le laboratoire d'Harold Urey, qui avait obtenu le prix Nobel de chimie pour la découverte du deutérium dans l'atmosphère. Stanley Miller s'est aussi appuyé sur les travaux du Soviétique Alexandre Oparine. Or il ne faut pas oublier le contexte géopolitique de l'époque, celui de la guerre froide entre l'Est et l'Ouest. Miller, qui avait 20 ans, a dû lutter, avec l'aide d'Urey et d'autres scientifiques, pour que son article soit accepté dans *Science* : la revue *[éditée par l'Association américaine pour l'avancement des sciences, NDLR]* refusait de publier ses résultats pour des raisons politiques ! Aujourd'hui, la géologie et la vie sont intimement liées, et on essaie de reconstituer en laboratoire, dans des conditions proches de l'atmosphère et de la Terre des origines, ce que nous appelons les « briques élémentaires du vivant ». Celles-ci sont principalement, en premier lieu, les acides aminés qui constituent les protéines, les chevilles ouvrières de toute cellule vivante. Mais aussi les pièces originaires des acides nucléiques qui sont les « nobles » ordonnateurs de toutes les actions qui gouvernent la vie et la reproduction du vivant – enfin, c'est ainsi que, pendant des dizaines d'années, les acides nucléiques (ADN principalement) furent considérés. On sait aujourd'hui que les choses sont beaucoup plus subtiles.

C. M. À cette même période, dans les années 1950, il faut aussi souligner les travaux de Francis Crick, James Watson, Maurice Wilkins et Rosalind Franklin sur l'ADN et sa structure. L'ADN est le support du patrimoine génétique des êtres vivants. Ces recherches, avec celles de Miller, sont deux grands pavés dans la mare ! Les travaux de Miller ont eu toute une descendance en lien avec la question des origines : ils ont ouvert un nouveau champ, celui de la chimie prébiotique, qui a prospéré par la suite grâce à l'amélioration des instruments de laboratoire. Aujourd'hui, nous disposons de techniques toujours plus élaborées en chimie analytique grâce auxquelles il a été possible de refaire les expériences, y compris celle de Miller, parfois dans des conditions différentes. Cela a permis de découvrir une profusion insoupçonnée de molécules organiques. Il me semble également important de mentionner le contexte scientifique plus large dans lequel se comprend aujourd'hui le vivant. Des biologistes comme l'Américain Carl Woese revisitent l'arbre du vivant à la lumière de marqueurs moléculaires. Ces recherches permettent de remonter le temps jusqu'à une origine évolutive commune à tous les organismes. C'est là que l'on touche

presque du doigt cet hypothétique dernier ancêtre commun, baptisé Luca (pour *Last Universal Common Ancestor*).

Quels sont, à la suite de ces travaux, les scénarios émis pour expliquer les origines du vivant ?

M.-C. M. De façon très schématique, le modèle le plus communément admis peut se résumer en trois points. Premièrement, une source d'énergie, de température, de pression ou divers rayonnements agissent sur un milieu primitif minéral et réducteur *[susceptible de céder des électrons et donc de produire une réaction d'oxydoréduction, NDLR]*. Cela déclenche des réactions chimiques qui aboutissent à la synthèse de certaines molécules organiques simples (sucres, acides aminés…) et des bases azotées comme l'adénine, la guanine, la thymine, l'uracile et la cytosine (A, G, T, U, C) qui sont les briques qui composent l'ADN et l'ARN. Deuxièmement, ces différentes molécules, réunies dans une même « soupe » (ou dans le creux d'une roche), s'associent pour constituer les macromolécules qui caractérisent le vivant : les protéines et les acides nucléiques comme l'ARN et l'ADN. Troisièmement, et peut-être de façon concomitante, il se forme une membrane qui englobe ces molécules, les isole de l'extérieur et les individualise, formant ainsi les êtres vivants primordiaux ; ceux-ci sont dotés d'un système métabolique échangeant avec son environnement, produisant sa propre matière organique et un support d'information « génétique » capable de se répliquer. Au fil de l'évolution, de ces protocellules aurait émergé Luca, qui serait à l'origine des trois grands domaines cellulaires qui composent le vivant d'aujourd'hui : les bactéries, les archées et les eucaryotes. Il s'agit là d'un scénario à très gros traits, dont chaque point fait l'objet de multiples recherches et débats.

Au-delà de ce scénario qui décrit le passage de l'inerte au vivant, existe-t-il un consensus pour définir le vivant ?

M.-C. M. Le médecin Xavier Bichat, qui a tenté de définir la vie à la fin du XVIIIe siècle, disait que *« la vie est l'ensemble des fonctions qui résistent à la mort* (1) ». De plus en plus de personnes reprennent désormais cette citation en la déformant, la traduisant par l'ensemble des « forces » qui résistent à la mort. Mais cela n'a absolument rien à voir ! Nous devons faire un énorme travail de rigueur et d'ascèse si nous voulons que la pensée et la recherche avancent. Les fonctions ne sont pas des forces ! Elles sont associées à une vision dynamique du vivant, comme l'échange, la catalyse, la réplication, la reproduction. Ce sont elles qui font que la vie est stable et en même temps susceptible de variations, qu'elle se perpétue et s'installe de manière pérenne dans tel ou tel endroit. Les entités vivantes ont des interactions dynamiques avec ces écosystèmes, avec d'autres organismes, d'autres molécules, d'autres territoires, etc. On ne connaît pas de vivant sur Terre qui vive indépendamment de son biotope. Donc, pour moi, il faut élargir « la fonction » à la notion de biotope, d'écosystème, de dynamisme et de transformation. Il s'agit d'un ensemble de propriétés qui s'engendrent les unes des autres.

C. M. Je suis tout à fait d'accord : il nous faut affiner notre manière de définir le vivant, les fonctions qu'on lui attribue, justement parce qu'on a trop souvent tendance à dire que ces fonctions ne sont autres que le métabolisme, la capacité de se reproduire ou encore le fait d'être une entité pour ainsi dire « individuée » par rapport son environnement. Mais il me semble plus exact, et plus fécond aussi, de se dire qu'en réalité, les choses sont beaucoup plus complexes ! Ces fonctions peuvent être réalisées de multiples manières, à des degrés de sophistication différents. C'est ce que nous enseigne l'observation de la biodiversité des micro-organismes. Lorsqu'on étudie la nature dans le détail, on y décèle une multitude d'entités plus ou moins fonctionnellement élaborées, en un sens plus ou moins vivantes aussi, ce qui est riche d'enseignements.

> **“ Luca serait à l'origine des trois grands domaines cellulaires qui composent le vivant d'aujourd'hui ”**
>
> **Marie-Christine Maurel**

1953

C'EST L'ANNÉE OÙ les Américains Stanley Miller et Harold Urey, à l'université de Chicago, ont tenté de reconstituer en laboratoire les conditions de l'atmosphère primitive. L'expérience a ouvert le champ de la chimie prébiotique.

Lorsqu'on étudie une bactérie comme *Escherichia coli,* avec sa membrane, son ADN, sa production de protéines, il est possible de conclure que l'on a affaire à du vivant. Mais, dans le même temps, observons un endosymbiote microbien, un organisme qui vit à l'intérieur d'une autre cellule : on découvre qu'il est capable d'avoir des fonctions qu'on attribue typiquement au vivant, mais « en moins bien ». Idem pour un virus géant, qui peut réaliser certaines choses mieux que l'endosymbiote, mais moins bien que la bactérie. Dès lors, nous pouvons dire qu'endosymbiote et virus sont moins vivants que la bactérie… mais clairement plus vivants qu'une molécule d'eau. Ils sont donc entre les deux, plus ou moins vivants.

M.-C. M. Les chercheurs découvrent aussi toute une série d'organismes ou de fragments d'organismes que l'on est incapable de caractériser et que l'on nomme de manière générique « Candidate Phyla Radiation ». Ils ont des formes, des dimensions qui n'avaient jamais été vues, ou des ribosomes (machineries moléculaires qui synthétisent les protéines à partir du code génétique) inconnus. Rappelons que nous ne connaissons que 15 à 20 % des organismes qui existent aujourd'hui sur la Terre ! C'est pourquoi, quand on s'intéresse aux origines de la vie, on parle des origines de la vie et non d'une origine de la vie qui plus est qui viendrait de Luca. Faire ce constat ouvre largement les portes à la curiosité, et à l'impérieuse nécessité de préserver toute la biodiversité qui nous entoure et dont nous ne sommes qu'une infime partie. Les origines du vivant et les origines de la biodiversité sont liées, et c'est l'une des voies que les biologistes pourraient emprunter.

Vous évoquez les biologistes, mais existe-t-il aujourd'hui une communauté scientifique unie, interdisciplinaire, qui s'empare de cette question des origines du vivant ?

M.-C. M. Il existe l'International Society for the Study of the Origin of Life qui, depuis les années 1970, réunit tous les trois ans des biologistes, des physiciens, des chimistes, des historiens des sciences et des philosophes. En tant que biologiste, j'ai souvent travaillé avec des physiciens, des astrophysiciens et des chimistes, et publié dans des revues de physique et de chimie. Nous devons tous ouvrir les bras aux autres disciplines, y compris à la philosophie. Il nous faut trouver une structure où nous puissions travailler ensemble, mettre à la portée des uns et des autres les outils dont nous disposons afin que la pluridisciplinarité, c'est-à-dire l'addition de plusieurs disciplines, devienne de l'interdisciplinarité.

C. M. La question des origines du vivant est une immense question, une énigme des plus tenaces. Elle nécessite la contribution d'un très grand nombre de domaines scientifiques. La géologie ou la micropaléontologie apportent des informations très importantes, puisqu'elles fournissent des marqueurs chronologiques ; les planétologues, qui étudient la formation des systèmes planétaires, concourent à cartographier l'environnement dans lequel le phénomène qui nous intéresse est susceptible de s'être déroulé. Ce n'est pas pour autant un « travail ensemble ». Nous ne sommes pas du tout dans un projet de *big science* comme la collaboration Ligo-Virgo pour la détection des ondes gravitationnelles ou d'autres, par exemple dans le domaine du spatial. Ce sont des projets colossaux qui reposent sur une interdisciplinarité très forte et soudée pour concevoir des instruments, réaliser les mesures, les analyser, etc. Concernant les origines de la vie, les projets sont beaucoup plus parcellaires. La nature même de la question est radicalement différente selon les disciplines.

Arrivera-t-on un jour à établir le scénario des origines du vivant ?

M.-C. M. Peut-être, dans un horizon très très lointain. Ou peut-être cette question restera-t-elle toujours inaccessible. Cela ne doit pas nous décourager ! Bien au contraire, elle stimule l'imagination et l'intelligence.

POUR EN SAVOIR PLUS

- Marie-Christine Maurel et Michel Cassé, *Xénobiologie. Vers d'autres vies,* Odile Jacob, 2018.
- Marie-Christine Maurel, *D'où vient la vie ?,* Le Pommier, 2014.
- Patrick Forterre, Louis d'Hendecourt, Christophe Malaterre et Marie-Christine Maurel, *De l'inerte au vivant. Une enquête scientifique et philosophique,* La Ville brûle, 2013.
- Christophe Malaterre, *Les Origines de la vie : émergence ou explication réductive ?,* Hermann, 2010.

> **“Nous ne connaissons que 15 à 20 % des organismes qui existent sur la Terre !”**
>
> Marie-Christine Maurel

À chaque peuple son mythe des origines

« Qu'est-ce qu'il y avait quand il n'y avait pas encore quelque chose, quand il n'y avait rien ? À cette question, les Grecs ont répondu par des récits et des mythes », **expliquait l'helléniste Jean-Pierre Vernant (1).** ***« Donc, avant tout, fut le Vide ; puis Terre (Gaïa) aux larges flancs, assise sûre à jamais offerte à tous les vivants, et Amour, le plus beau parmi les dieux immortels, celui qui rompt les membres et qui, dans la poitrine de tout dieu comme de tout homme, dompte le cœur et le sage vouloir »*** **: ainsi débute la *Théogonie* du poète Hésiode (VIIIe-VIIe siècles avant notre ère), qui évoque la naissance des dieux. Les Grecs ne furent pas les seuls à construire des récits relatifs à l'origine de la Terre, du ciel, et des êtres vivants. On en trouve chez la plupart des peuples. La majorité de ces narrations mythiques évoquent un principe créateur – un dieu, une idée ou un élément – à la source de toute chose. L'Univers peut exister dans la pensée du Dieu créateur avant même la création : c'est ce que pensent les Dogon d'Afrique de l'Ouest, mais aussi les hindous. La création des êtres humains fait également l'objet de récits très variés. Que ce soit à partir de matière végétale, de terre, de pierre, de boue, elle est souvent le fruit d'une intervention divine. C'est le cas d'Adam dans la Genèse. En Chine, les humains sont créés par les démiurges Fuxi et Nuwa. Cette dernière, pour aller plus vite, trempe le bout d'une liane dans la boue et la secoue : les morceaux qui tombent forment alors les premiers hommes (2).** ■ **M. G.**

▲ *La plupart des peuples ont construit des récits sur l'origine de la vie. Dans la mythologie chinoise, le couple de dieux Nuwa et Fuxi, ici entrelacés par leurs queues de serpent, aurait créé les êtres humains.*

PHOTO12/ALAMY

(1) Jean-Pierre Vernant, *L'Univers, les dieux, les hommes,* Seuil, 1999.
(2) Jean-Loïc Le Quellec, Bernard Sergent, *Dictionnaire critique de mythologie,* CNRS éditions, 2017.

L'une des disciplines phares accomplissant de grandes performances aujourd'hui est la biologie de synthèse. Grâce à elle, nous sommes capables de reconstruire des enveloppes baptisées « vésicules », d'encapsuler, dans ces vésicules, des petits brins d'ARN ou des petits métabolismes. On reproduit ainsi quelques fonctions du vivant. La biologie de synthèse est également en capacité d'ôter, les uns après les autres, tous les gènes jugés non indispensables chez une bactérie très simple, pour savoir quel est le plus petit organisme capable d'exister.

C. M. Se poser la question de l'origine de la vie, c'est vouloir faire le pont entre un état de la matière caractérisé par la présence d'entités chimiques relativement simples – éventuellement les mêmes qui existaient il y a 4 milliards d'années sur notre planète – et des entités clairement vivantes qui ressembleraient à une sorte de cellule minimale. Mais le fossé est énorme et très difficile à franchir, aujourd'hui encore, car ce qu'il y a entre les deux demeure très flou. Une théorie ou une expérience unique ne permettra jamais de franchir ce fossé, pour ainsi dire de manière spontanée. Ce sera forcément bien plus graduel et complexe… même si j'aimerais bien qu'on me prouve le contraire. ■

Propos recueillis par Mathias Germain

(1) Xavier Bichat, *Recherches physiologiques sur la vie et la mort,* Flammarion, 1800 (réédition chez Flammarion, 1995).

Traquer les premières traces de vie terrestres

Du désert brûlant d'Australie aux vallées glacées du Groenland ou aux collines verdoyantes d'Afrique du Sud, les scientifiques cherchent les premières traces de vie dans les plus anciens sédiments terrestres. Démontrer l'origine biologique de ces reliques fossiles est un défi en raison de leur taille – minuscule –, de leur simplicité et de leur âge, pouvant atteindre plus de 3 milliards d'années. Entre analyses poussées, concordance des indices et controverses, les chercheurs mènent, sur le terrain comme en laboratoire, une véritable enquête sur nos origines.

SCIENCE PHOTO LIBRARY / GARLICK, MARK

▶ *Voici plus de 4 milliards d'années, notre planète était couverte d'océans et parsemée de quelques îles volcaniques (ici, vue d'artiste de la Terre primitive).*

Frances Westall
GÉOLOGUE, DIRECTRICE DE RECHERCHE CNRS, CENTRE DE BIOPHYSIQUE MOLÉCULAIRE, ORLÉANS

Frédéric Foucher
PHYSICIEN, INGÉNIEUR DE RECHERCHE CNRS, CENTRE DE BIOPHYSIQUE MOLÉCULAIRE, ORLÉANS

Keyron Hickman-Lewis
GÉOLOGUE, CHERCHEUR, MUSÉUM D'HISTOIRE NATURELLE, LONDRES

L'étude des plus anciennes traces de vie sur Terre est semée d'embûches. En premier lieu, en raison de leur rareté. Il faut en effet des conditions géologiques très particulières pour que ces restes et les formations sédimentaires qui les accueillent soient préservés pendant plusieurs milliards d'années (1). De plus, ici, point de coquillages ou d'os de dinosaure, mais les restes très subtils de micro-organismes primitifs dont l'observation seule ne suffit pas à les distinguer d'artefacts minéraux ou organiques sans lien avec la vie ! Les chasseurs de reliques fossiles que nous sommes se doivent donc d'utiliser toute une batterie d'instruments, allant des plus modestes au plus élaborés, afin de collecter des indices et de rassembler les pièces du puzzle. Cependant, et malgré toutes les précautions qui sont prises, la polémique est toujours prête à surgir parmi les experts.

La vie sur Terre est probablement apparue il y a plus de 4 milliards d'années, sur une planète alors très différente de celle que nous connaissons aujourd'hui (2). L'atmosphère ne contenait pas encore d'oxygène – formé plus tard sous l'action prolongée de la photosynthèse oxygénique (*). Elle était composée principalement de dioxyde de carbone (CO_2) et d'autres gaz tels que l'ammoniac (NH_3), le méthane (CH_4) et la vapeur d'eau (H_2O). L'eau de mer était également beaucoup plus chaude et légèrement plus acide qu'aujourd'hui. Enfin, notre planète était couverte d'océans avec seulement quelques îles volcaniques émergées. D'innombrables volcans crachaient de la lave tandis que, de la croûte, des évents hydrothermaux rejetaient des eaux riches en nutriments et en silice. C'est là, à l'interface des roches volcaniques chaudes, de l'eau de mer, et des effluents hydrothermaux, que la vie s'est développée. Et la silice a joué un rôle primordial dans la préservation d'anciennes traces de vie – ce que l'on appelle aussi des biosignatures – mais également dans celle des formations rocheuses dans lesquelles on les trouve.

Hélas, il n'existe plus, de nos jours, de roches susceptibles de contenir des traces de vie bien préservées datant de cette époque. En effet, le bombardement météoritique, la tectonique des plaques et le métamorphisme (*) ont progressivement conduit à la destruction des fossiles les plus anciens. Ainsi, les plus vieilles traces de vie généralement acceptées par la communauté scientifique sont âgées de « seulement » 3,5 milliards d'années (3). Certes, il est possible qu'il y ait des traces dans des roches plus anciennes, au Groenland, mais ces dernières ont été tellement altérées par l'enfouissement dans la croûte, du fait de l'activité tectonique de la Terre, que leur étude est très difficile et les interprétations, délicates. Heureusement, il est possible de trouver des sédiments bien préservés à partir de 3,5 milliards d'années. Leur conservation est liée à la « fossilisation » de ces roches par la silice (on parle de silicification) et à l'évolution de la croûte de la Terre, avec la formation des premiers petits morceaux de continents, plus stables. Ces sédiments fossilifères se trouvent actuellement dans les montagnes de Barberton à l'est de l'Afrique du Sud, et dans le Pilbara, un lieu désertique dans le nord-ouest de l'Australie. On l'aura compris, ces roches datées d'il y a 3,5 milliards d'années renferment donc les plus anciennes traces de vie préservées, pas les traces des premières formes de vie. Ces traces ne fournissent de surcroît qu'un aperçu de la diversité microbienne qui existait

3,5

MILLIARDS D'ANNÉES,
c'est l'âge des roches renfermant les plus anciennes reliques de vie préservées.

FRÉDÉRIC FOUCHER - DELPHINE FOUCHER - KETRON HICKMAN-LEWIS

à l'époque, car beaucoup de ces espèces ne peuvent pas être fossilisées ou ne vivent pas dans des environnements favorables à leur fossilisation. Celles qui sont parvenues jusqu'à nous sont de plusieurs natures. Les microbes peuvent être préservés dans une croûte minérale qui reproduit leur forme ; ils peuvent ainsi laisser des empreintes caractéristiques dans des minéraux, un peu comme les dinosaures ont laissé des empreintes de pas fossilisées. On retrouve également des restes organiques momifiés, à la manière des restes humains retrouvés dans les tourbes du Danemark. Il est aussi possible qu'il ne subsiste que des molécules organiques dégradées dans une gangue minérale. En pratique, il est plutôt rare de trouver des fossiles morphologiques de bactéries dans les roches anciennes.

On peut aussi retrouver des traces de l'activité métabolique de l'organisme original ! Ce qui aide également à repérer ces reliques fossiles. Par exemple, les êtres vivants utilisent de préférence certains isotopes de carbone, de soufre, d'azote, ou de fer, créant ainsi des concentrations anormales dans les structures fossiles associées que nous pouvons repérer. Le changement du micro-environnement autour des microbes peut aussi conduire à la précipitation de minéraux, comme le carbonate de calcium ou les sulfures de fer que l'on retrouve dans les roches après fossilisation. C'est tout un ensemble d'indices qu'il faut replacer dans leur contexte géologique pour leur donner un sens.

En outre, forts des expériences en laboratoire, nous savons maintenant comment les bactéries se fossilisent. Le processus est assez facile à comprendre et nous sommes parvenus à le reproduire en tube à essais (4). Pour ce faire, les bactéries à fossiliser sont placées dans une solution saturée en minéral, en l'occurrence ici il s'agit de silice, étant donné que les plus anciens microfossiles ont été silicifiés. La silicification commence dans les premières vingt-quatre heures et continue jusqu'à l'épuisement du minéral en solution. La précipitation du minéral forme alors un ciment, ou gangue, dans lequel l'organisme est piégé. Que se passe-t-il exactement ? On peut imaginer la surface du micro-organisme comme la peau d'un hérisson. L'enveloppe extérieure de l'organisme est composée de molécules dont certaines parties, appelées groupes fonctionnels (hydroxyles ou carboxyles, par exemple), favorisent la précipitation et la fixation du minéral, parfois directement, parfois en utilisant un élément de liaison tel le fer. Une fois tous les groupes fonctionnels occupés, le minéral en solution continue à croître par un processus de polymérisation, jusqu'à former une croûte tout autour de l'organisme, et parfois même à l'intérieur. Lors de ce processus, l'organisme meurt et les molécules organiques qui le constituaient se dégradent et sont piégées dans la gangue minérale.

Avant de chercher et d'identifier des traces de micro-organismes dans une roche, il faut d'abord avoir une idée de ce que l'on cherche et quelques connaissances sur la vie microbienne actuelle. On sait que les micro-organismes forment des colonies au sein desquelles, généralement, plusieurs espèces coexistent. Parfois ces colonies s'organisent

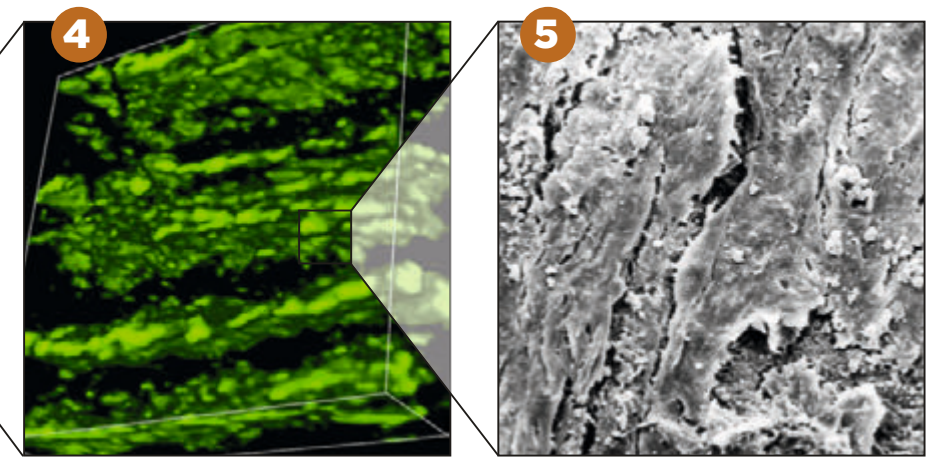
(*) **La photosynthèse oxygénique** est un exemple particulier de photosynthèse, dans laquelle du dioxyde de carbone et de l'eau sont transformés en sucre et en oxygène sous l'action de la lumière.

(*) **Le métamorphisme** désigne les transformations subies par les roches à l'état solide au cours du temps, à cause des impacts, de leur enfouissement, etc.

(*) **Un biofilm** est une communauté multicellulaire de micro-organismes, comme des bactéries, qui adhérent entre eux et à une surface (la plaque dentaire est un biofilm).

(*) **Le Paléoarchéen** désigne l'époque géologique située entre 3,6 et 3,2 milliards d'années.

FRANCES WESTALL - DANIELE MARCHESINI -



FRÉDÉRIC FOUCHER - FRANCES WESTALL

ZOOM SUR UNE ROCHE FOSSILE

Démontrer l'origine biologique de fossiles de plusieurs milliards d'années nécessite de resituer chaque indice dans son contexte géologique et minéralogique à différentes échelles. Ainsi, on a prélevé en Afrique du Sud (1) un morceau de roche (2) sur lequel on a observé un ensemble de tapis microbiens dans une lame mince au microscope optique (3). Puis le carbone présent a été imagé en 3D par spectroscopie Raman (4), avant une étude au microscope électronique à balayage (5).

en biofilm (*) et, si ce sont des bactéries photosynthétiques, elles forment des paquets de biofilms assez épais, voire des édifices en trois dimensions selon les conditions environnementales. Les micro-organismes sont étroitement liés à leur environnement immédiat. Et ils obtiennent leur énergie de différentes façons : par oxydation-réduction d'un substrat inorganique (on parle d'organismes chimiolithotrophes), par oxydation de la matière carbonée principalement issue des dépouilles d'organismes morts (on parle d'organismes chimio-organotrophes), ou à partir de la lumière du Soleil (on parle d'organismes phototrophes). Ces derniers se développent bien plus rapidement que les autres grâce à cette source d'énergie efficace et pérenne. À l'origine, ces organismes pratiquaient la photosynthèse anoxygénique, c'est-à-dire qui ne produit pas de dioxygène. Ils ont évolué par la suite, après trois milliards d'années, vers des phototrophes oxygéniques, qui recrachent de l'oxygène comme déchet. C'est grâce à cet oxygène que, plus tard, la vie a pu évoluer, d'abord en eucaryotes (cellule avec un noyau distinct), puis en organismes multicellulaires. Bien sûr, le schéma présenté ci-dessus est simplifié mais c'est ce que l'on peut interpréter des restes contenus dans les roches.

Une fois tous ces indices rassemblés, les chercheurs peuvent orienter plus efficacement leur recherche de traces de vie fossile. Premier lieu précieux pour ce faire : les roches du Paléoarchéen (*) de 3,5 milliards d'années. Malgré leur grand âge, elles en sont riches. Grâce à la « silicification » presque instantanée de la vie et des sédiments environnants, on y retrouve des colonies et des tapis microbiens relativement bien préservés. Cependant, il existe des limites dans les interprétations possibles et de multiples précautions doivent être prises avant de conclure à la présence de vie microbienne fossile. Premièrement, il faut montrer que les fossiles observés ont le même âge que la roche dans laquelle ils se trouvent et qu'ils ne sont pas le fruit d'une colonisation ultérieure. Il faut établir que les structures ont été formées et préservées avant la silicification de la roche. Dans le cas des microbes fossiles de 3,5 milliards d'années, la silicification des roches s'est faite en même temps que celle des micro-organismes colonisant les sédiments. Une fois cette étape franchie, reste encore à démontrer l'origine biologique des structures observées. Là encore, l'étude est semée de difficultés car les organismes sont petits et ne produisaient pas beaucoup de biomasse. Surtout, il y existe maints artefacts d'origine minérale ou organique, qui ressemblent à s'y méprendre à ces présupposées signatures de vie. Par exemple, la

Grâce à la « silicification » de la vie, on retrouve des colonies et des tapis microbiens assez bien préservés

silice hydrothermale forme des petites sphères ressemblant à des bactéries en forme de coque. Ainsi, si les recherches dans le domaine fleurissent depuis le XXe siècle, elles font suite à des décennies de controverses et de débats enflammés qui perdurent encore aujourd'hui.

Un exemple fameux est la détection de structures carbonées dans un chert (*) de 3,46 milliards d'années du Pilbara, en Australie-Occidentale. Ces structures étaient interprétées jusqu'à récemment comme étant des cyanobactéries fossiles – les cyanobactéries sont des organismes photosynthétiques oxygéniques. Or, d'après des études géologiques du terrain, ces roches se situaient dans un environnement hydrothermal, c'est-à-dire un habitat souterrain, incompatible avec l'existence d'organismes photosynthétiques ayant besoin de la lumière du Soleil tels que des cyanobactéries.

Cet exemple illustre l'importance du travail de terrain. Sans ces études in situ, et sans les connaissances du contexte régional et local de l'échantillon récolté, les indications retrouvées, qu'elles soient physiques, comme les fossiles, ou géochimiques, comme la concentration de certains éléments essentiels pour la vie ou les molécules organiques issues de la dégradation des organismes, ne pourront pas être correctement interprétées.

Tels des enquêteurs, les chercheurs multiplient donc les observations et les analyses. Ils font pour cela appel à tout un panel de techniques et d'instruments de plus en plus sophistiqués, de la cartographie de terrain à l'analyse élémentaire à l'aide du synchrotron (*). Ils corroborent ensuite les indices afin d'obtenir un schéma global cohérent qui relie l'organisme fossile à son environnement, la biosignature à son contexte. Cette approche

Les missions sur Mars continuent

Bien qu'aujourd'hui déserte et gelée, la surface de la planète Mars présentait des conditions compatibles avec l'émergence de la vie (présence de molécules organiques, d'une source d'énergie et d'eau liquide) il y a 4 milliards d'années. Si celle-ci est effectivement apparue sur Mars, elle est nécessairement restée peu évoluée, tirant son énergie non pas de la photosynthèse, mais de réactions chimiques (comme les organismes chimiotrophes de la Terre primitive). Nos connaissances de ces microfossiles et des biosignatures associées sont donc très utiles pour guider la recherche de vie sur la planète Rouge.

▲ *Le rover d'ExoMars 2022 analysera les échantillons prélevés dans un laboratoire embarqué.*

Malheureusement, là-bas, il n'est pas possible de mettre en œuvre les protocoles expérimentaux employés sur Terre : la préparation des échantillons est limitée et les instruments de pointe utilisés en laboratoire sont incompatibles avec une mission spatiale. Les missions dédiées à la recherche de vie martienne, comme Mars Science Laboratory et son rover Curiosity de la Nasa actuellement dans le cratère de Gale, ou ExoMars 2022 (ESA/Roscosmos) qui atterrira sur le site Oxia Planum en 2023, font donc preuve de beaucoup d'ingéniosité en utilisant une série d'instruments permettant de simuler le travail du géologue, des observations de terrain et de la collecte d'échantillons jusqu'à l'analyse minéralogique et compositionnelle. Malgré tout, il paraît peu probable que l'on observe des bactéries fossiles, ou même des colonies bactériennes, sur Mars. En revanche, il serait possible de détecter des molécules dégradées issues de la vie – s'il y en a eu – sur le site d'atterrissage. En vue du défi posé par la recherche de vie in situ sur Mars, les chercheurs se préparent maintenant au retour d'échantillons martiens, avec les missions Mars 2020 (Nasa), qui a décollé à l'été 2020, puis Mars Sample Return (Nasa/ESA) qui permettra, dans les années 2030, de rapporter des échantillons pour les analyser sur Terre. La difficulté est immense, à la mesure de ce que représenterait la découverte de traces de vie sur Mars et de ce qu'elle changerait concernant notre vision de la vie et de l'Univers. ■

F. W., F. F. et K. H.-L.

ESA-AOES MEDIALAB/M.THIEBAUT

multi-échelle, allant de la formation géologique à celle de l'atome, est la seule qui permette de s'assurer de la bonne interprétation des trouvailles (voir les illustrations p. 29). On a ainsi retrouvé des fossiles de colonies de bactéries dans le voisinage des sources chaudes, où les eaux hydrothermales apportaient en abondance des nutriments. Initialement, c'est en se fondant sur les connaissances de la microbiologie actuelle, mais aussi sur une bonne dose d'intuition, qu'une étude poussée de la structure morphologique des colonies et de leur composition en certains éléments, comme les métaux de transition (fer, nickel, cobalt, arsenic, etc.) qui sont essentiels pour la vie, nous a permis d'identifier les plus anciennes traces de vie. Depuis, les études détaillées ont permis d'en apprendre plus sur ces organismes du Paléoarchéen.

ABONDANCE DE BIOSIGNATURES

Dans les environnements pauvres en nutriments, dits oligotrophes, ce sont des organismes chimiotrophes (surtout les chimiolithotrophes) qui ont été mis en évidence (5). Ils colonisaient les surfaces des grains volcaniques dans les sédiments. Du fait du manque de nutriments autres que le substrat minéral, les lithotrophes n'étaient pas cannibalisés par les organotrophes, peu présents dans cet environnement. Ils ont ainsi été magnifiquement préservés et, à l'aide d'un microscope électronique, il est possible de les observer, de voir la division ou la mort (lyse) d'une cellule, ou encore d'identifier des espèces de différentes tailles sur un même cliché, comme dans une colonie microbienne moderne.

Pour les phototrophes, leur identification est largement facilitée par leur mode de vie. Ces bactéries forment des biofilms à la surface de sédiments. Comme elles ont besoin du soleil comme source d'énergie, et du CO_2 dissout dans l'eau comme source de carbone, on les trouve dans des environnements peu profonds, près de la côte et même dans l'estran. Elles étaient enveloppées d'épaisses couches de mucus ou de polymères, qui les protégeaient de l'environnement parfois extrême de la Terre primitive. En effet, exposées sur la plage, les bactéries phototrophes pouvaient être sujettes à la dessiccation et soumises au rayonnement ultraviolet, alors important, en l'absence de couche d'ozone – celle-ci est apparue plus tard, avec l'oxygénation de l'atmosphère. Leurs couches de mucus facilitaient aussi l'accrochement au substrat granulaire, aidant les biofilms à résister aux vagues et aux courants. Il a également été découvert que, parfois, les biofilms poussaient verticalement afin de former des édifices en trois dimensions qu'on appelle des stromatolithes (6).

Il a fallu aussi une bonne dose d'intuition pour réussir à identifier les plus anciennes traces de vie

Autre découverte : malgré leur grand âge, les restes des colonies microbiennes du Paléoarchéen contiennent des signatures de molécules appartenant aux familles des bactéries et aussi des archées (*), ainsi que des signatures métaboliques indiquant une coexistence entre les familles et les espèces, les organotrophes dégradant la matière organique primaire des organismes phototrophes et lithotrophes morts. Exactement comme pour la vie microbienne actuelle.

Que conclure de cette abondance de biosignatures dans des roches de 3,5 milliards d'années ? Que la vie fourmillait déjà à cette époque et qu'elle était relativement évoluée – même si le processus de photosynthèse est apparu plus tardivement dans l'évolution de la vie, les premiers organismes étant probablement chimiotrophes, tirant leur énergie d'oxydation des minéraux ou carbone. De ce fait, il n'est pas surprenant qu'il y ait quelques indications de vie, même mal préservées, dans les roches groenlandaises du lieu-dit Isua, datées de 3,7 milliards d'années. Enfin, cette complexité, présente il y a 3,5 milliards d'années, indique que la vie elle-même est probablement apparue plus tôt qu'il y a 4 milliards d'années, peut-être dès que l'eau à la surface de la Terre a pu se refroidir à une température compatible avec la vie, autour de 80 °C. ■

(1) F. Westall *et al., Astrobiology, 15,* 998, 2015.
(2) F. Westall *et al., Astrobiology, 18,* 259, 2018.
(3) K. Hickman-Lewis, *Precambrian Res., 312,* 45, 2018.
(4) F. Orange *et al., Geobiology, 7,* 403, 2009.
(5) F. Westall *et al., Geology, 43,* 615, 2015.
(6) A. C. Allwood *et al., Nature, 441,* 714e718, 2006.

▲ *Ce chert sud-africain, roche riche en silice, date de 3,3 milliards d'années.*

CYRIL FRESILLON/CBM/CNRS PHOTOTHÈQUE

(*) **Un chert** est une roche riche en silice, très dure, aussi appelée silex.

(*) **Le rayonnement synchrotron** est une source de lumière extrêmement brillante qui permet d'explorer la matière inerte ou vivante.

(*) **Les archées** forment, avec les bactéries et les eucaryotes, l'ensemble des organismes. Archées et bactéries se ressemblent morphologiquement (absence de noyau) mais sont génétiquement diverses.

LES SIX RÉGIONS OÙ AFFLEURENT LES PLUS ANCIENNES ROCHES

La Terre est une planète vivante : l'érosion altère les sols et les mouvements tectoniques enfouissent les terrains les plus anciens. Ainsi, bien que notre planète soit âgée de 4,5 milliards d'années, on trouve peu de roches de plus de 3 milliards d'années susceptibles de contenir des fossiles encore bien préservés des premières formes de vie. Tour du globe des terrains les plus anciens, et des traces de vie reculée que traquent les scientifiques.

Texte : Sylvain Guilbaud. Infographie : Bruno Bourgeois

AFRIQUE DU SUD

LES TAPIS DE JOSEFSDAL

C'est dans la région de Barberton, en Afrique du Sud, que l'on trouve des roches composées à plus de 95 % de quartz (cherts), dans lesquelles il est possible d'observer des micro-organismes de 3,33 milliards d'années. Ces tapis microbiens photosynthétiques sont ici (rond central) vus en microscopie électronique à balayage (barre d'échelle : 10 micromètres).

CANADA

LE CRATON DU LAC DES ESCLAVES

Dans cette région des Territoires du Nord-Ouest, on trouve de la croûte terrestre préservée depuis 4 milliards d'années. Mais ces gneiss, qui sont remontés à la surface au fil du temps, se sont formés en profondeur : ils ne peuvent pas contenir de traces de vie aussi anciennes.

BRÉSIL

L'ÉTAT DE PERNAMBOUC

La croûte terrestre y est très ancienne, remontant à environ 3,5 milliards d'années. Comme en Inde et au Canada, ces roches ne sont pas adéquates pour y chercher des traces de vie reculée.

DANIELE MARCHESINI - FRANCES WESTALL - INFOGRAPHIE : BRUNO BOURGEOIS

GROENLAND

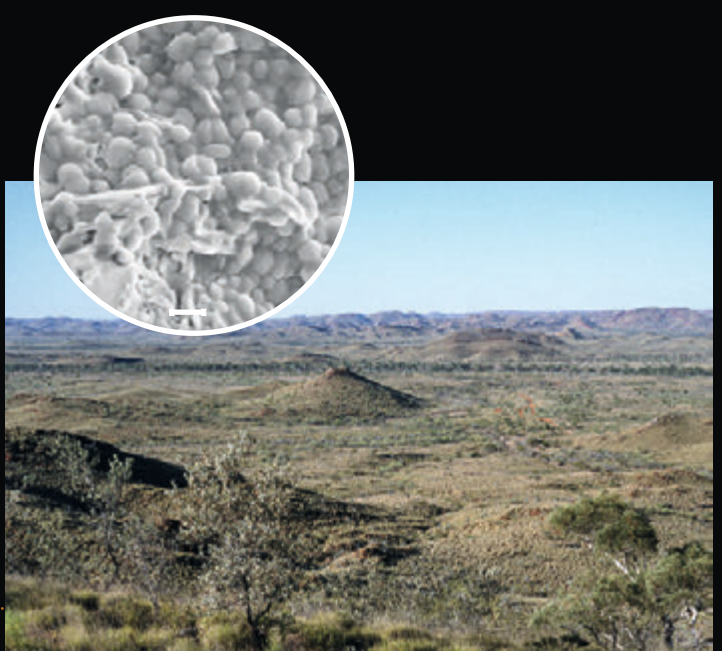
LA SIGNATURE ISOTOPIQUE D'ISUA

Les roches d'Isua, au Groenland, sont âgées de 3,7 à 3,8 milliards d'années. Malheureusement, elles ont subi un métamorphisme important, si bien qu'il est impossible d'y retrouver des microfossiles bien préservés. Parmi les indices possibles de traces de vie disparue figure la signature isotopique du carbone 13 : un déficit en carbone 13, noté $\delta^{13}C < 0$, y est observé, ce qui est généralement associé à la matière carbonée d'origine biologique.

INDE

LA RÉGION DE COORG

De la croûte terrestre remontant à 3,5 milliards d'années est présente dans cette région. Ces roches métamorphiques se sont formées en profondeur avant de remonter à la surface et ne peuvent donc pas contenir de traces de vie de cette époque.



AUSTRALIE

LES LITHOTROPHES DE KILTS GAP

C'est dans la région du Pilbara, à l'ouest du continent, que l'on retrouve les plus anciennes traces de vie qui dateraient d'environ 3,5 milliards d'années. Parmi elles, des colonies microbiennes lithotrophes (c'est-à-dire tirant leurs nutriments et leur énergie des minéraux) de Kilts Gap. Ce grossissement (rond central) est une image de microscopie électronique à balayage des fossiles en forme de coques (barre d'échelle : 1 micromètre).

L'exopaléontologie ou la quête d'organismes fossiles dans l'Univers

L'âge « astronomique » de l'Univers (13,5 milliards d'années), le foisonnement des espèces et leur rapide succession sur Terre, leur relative facilité de fossilisation… Autant d'indices qui laissent à penser que la vie pourrait aussi avoir existé ailleurs que sur notre planète et qu'il serait possible d'en retrouver des traces sous forme fossile. C'est ce à quoi s'emploie l'exopaléontologie, une discipline en plein essor, dont les spécialistes sont désormais associés aux programmes des missions spatiales en préparation.

Jean-Sébastien Steyer
PALÉONTOLOGUE, CNRS, MUSÉUM NATIONAL D'HISTOIRE NATURELLE, PARIS
Il est auteur ou coauteur de plusieurs ouvrages, dont Exquise Planète *(Odile Jacob, 2014).*

« Dans cet Univers démesuré, affirmer qu'il n'y a pas de vie ailleurs que sur Terre ne revient-il pas à plonger un verre dans l'océan et à conclure qu'il n'abrite pas de poissons ? » Ces mots du biologiste Franck Courchamp (1) résument bien l'état d'esprit actuel quant à la recherche de possibles formes de vie extraterrestre : leur existence relève de moins en moins de la science-fiction.

Le paléontologue sait bien que la fossilisation, courante dans de nombreux écosystèmes, est un phénomène instantané à l'échelle des temps géologiques et parfois humains. Ainsi, quelques heures suffisent pour pétrifier un cadavre dans des eaux saturées en sels minéraux. En considérant la rapide succession d'espèces au cours du temps et leur relative facilité de fossilisation, le vaste « Univers-océan » évoqué par Franck Courchamp pourrait ainsi cacher de nombreux poissons… et regorger de fossiles. En effet, si une forme de vie existe ailleurs dans l'Univers, pourquoi serait-elle synchrone avec la nôtre ? D'autant que nous, *Sapiens,* sommes arrivés il y a seulement 300 000 ans. Un battement de cils.

C'est là qu'entre en jeu l'exopaléontologie, la recherche d'une vie extraterrestre fossile, discipline en plein essor. Il ne s'agit pas (encore) d'envoyer des paléontologues en combinaison sur Mars, mais d'équiper nos rovers d'instruments adéquats. Cependant, comment reconnaître une forme de vie extraterrestre fossile ? En regardant d'abord ce qui se passe sur Terre. Un fossile, reste ou trace ancienne d'organisme disparu, est caractérisé par sa forme, sa composition et son encaissant, c'est-à-dire le milieu dans lequel il a été découvert. Ces trois critères sont nécessaires pour son identification. Les parties indurées (squelette, dent, structure ligneuse) se fossilisent plus facilement que les tissus labiles (tube digestif, tissu musculaire ou dermique), qui peuvent cependant se minéraliser si le milieu le permet. On parle alors de conservations exceptionnelles (c'est le cas de petits amphibiens d'environ 300 millions d'années découverts dans une ancienne mine de charbon en Saône-et-Loire, ou de mammifères à fourrure d'environ 7 millions d'années et préservés dans une diatomite – roche constituée de micro-algues siliceuses – en Ardèche). Au fil du temps, la matière organique est remplacée par la matière minérale de l'encaissant, ce qui préserve les structures biologiques à l'échelle microscopique. La fossilisation dépend donc des conditions physico-chimiques du milieu et, par extension, de celles de l'exoplanète en question, celles-ci pouvant en outre varier au cours de son histoire. Elle nécessite parfois un solvant (comme l'eau), et une matrice plastique (hydrocarbures, résine, glace) ou meuble (sable,

L.HONNORAT/INNOVAXIOM

▲ *Sur une planète lointaine, les vestiges d'une vie microbienne pourraient s'organiser en « exostromatolites » (image d'artiste), pendants extraterrestres des stromatolites retrouvés sur Terre comme indice de la présence d'anciens organismes.*

JOHN DAVID BOSWELL / AMBER MOUNTAIN STUDIOS

régolithe) qui englobe l'organisme et le fixe. Autant d'éléments qui font penser que les glaces d'Europe et d'Encelade, les lunes de Jupiter et de Saturne, pourraient bien être des agents propices à la fossilisation. Et cela ouvre des perspectives intéressantes en matière de projets de recherche (lire p. 44).

DES FORAGES SUR MARS

Plus près de nous, la planète Rouge attire bien sûr l'attention des exopaléontologues car elle était en partie recouverte d'eau liquide il y a quelque 4 milliards d'années – cette eau étant encore présente localement à l'état solide. L'un des objectifs des programmes américain Mars 2020 et européen ExoMars 2022 est d'y détecter des traces de vie. Le rover d'ExoMars 2022 forera le sol jusqu'à 2 m de profondeur, contre 6 cm pour le rover de Mars 2020, et collectera des échantillons les moins altérés possible par l'oxydation ou les rayonnements en surface. Les capsules d'échantillons seront brûlées sur place pour être analysées par des spectromètres et un chromatographe embarqués en vue de détecter des molécules organiques très ciblées.

Ces recherches constituent un premier pas, mais la composition d'un éventuel fossile martien pourrait être très différente de ce que nous connaissons sur Terre. La diversité même des processus de fossilisation sur notre planète rend difficile l'identification de paléobiomarqueurs associés. La présence de stéranes (produits du métabolisme) et de pyrite (minéral formé de disulfure de fer) a été avancée pour mettre en évidence d'étranges fossiles d'eucaryotes très anciens (environ 2,1 milliards d'années) découverts au Gabon il y a dix ans. Mais il a fallu croiser ces indices avec d'autres (issus de l'analyse isotopique du soufre et de la microtomographie à rayons X notamment) pour attester de leur origine biologique. Comme on ignore les processus de fossilisation sur Mars, l'identification de paléobiomarqueurs pourrait être encore plus délicate.

L'attention des chercheurs est aussi tournée vers la morphologie des objets rencontrés : le rover d'ExoMars 2022 est équipé d'une puissante caméra qui fait office de loupe de géologue de terrain. Sa focale comprise entre 11,5 cm et l'infini est idéale pour scruter les roches en surface. Comme ce rover est muni d'une foreuse, on aurait pu aussi le doter d'une minicaméra télescopique à focale très courte dans l'espoir de déceler des biofilms (ou « voiles bactériens ») fossiles et d'autres structures stromatolitiques (*) en coupe. Chaque mission spatiale est un défi technologique en soi et toute l'instrumentation ne peut pas être à disposition sur place.

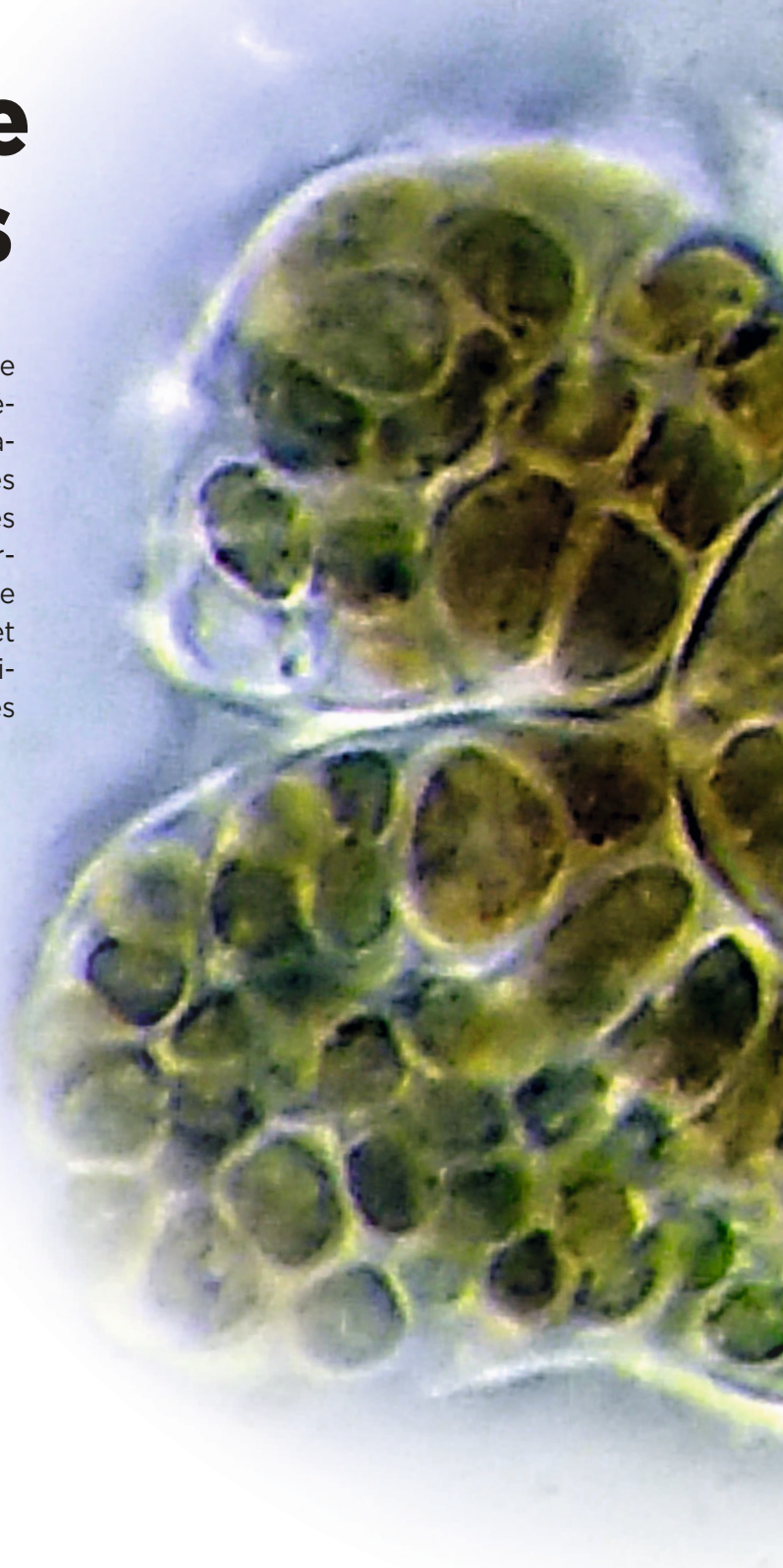
L'auteur Arthur C. Clarke disait : *« Deux possibilités existent : soit nous sommes seuls dans l'Univers, soit nous ne le sommes pas. Les deux sont terrifiantes. »* Une troisième possibilité existe : nous ne sommes pas seuls dans l'Univers, mais les autres formes de vie sont figées pour l'éternité. Tout aussi terrifiant ? ■

(*) Les stromatolites sont des structures fossilisées formées en milieu aquatique grâce à des couches de micro-organismes (biofilms).

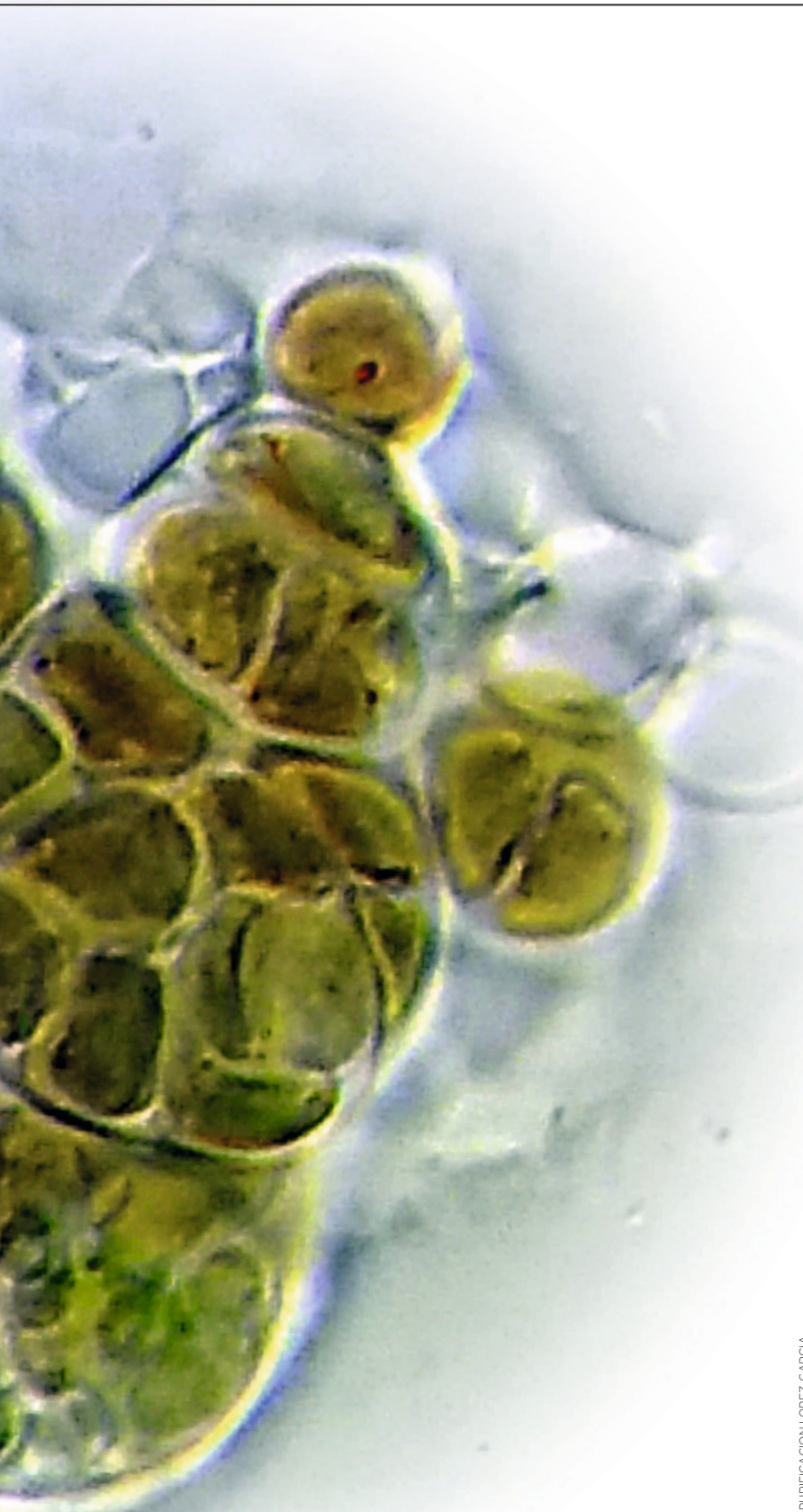
(1) Franck Courchamp et Clément Morin, « Une espèce à part – Vie unique », série documentaire. tinyurl.com/vie-a-part-arte, 2018.

Remonter l'arbre généalogique des microbes

Rechercher les origines de la vie cellulaire ne passe pas seulement par l'étude d'hypothétiques fossiles microbiens. Les micro-organismes qui vivent aujourd'hui dans les sols, les océans, et même au sein d'autres organismes vivants, constituent autant de sources d'information afin de remonter aux origines de la vie cellulaire. Leurs formes, leurs métabolismes et leurs gènes offrent des indices pour déterminer à quoi ressemblaient les cellules primitives apparues il y a 3 ou 4 milliards d'années.



▶ *Il y a 2 milliards d'années, les cyanobactéries ont inventé la photosynthèse oxygénique (ici, vue au microscope, une colonie de cyanobactéries endolithiques – vivant à l'intérieur de la roche – d'un lac alcalin au Mexique).*



PURIFICACION LOPEZ-GARCIA

Il y a un an, des biologistes japonais annonçaient être parvenus à cultiver un étrange micro-organisme, *Prometheoarchaeum syntrophicum*. Cette cellule, dont le corps rond – qui ne dépasse pas 0,5 micromètre de diamètre – est prolongé de longs filaments, provient de sédiments qui ont été prélevés à 2 533 m de profondeur, à proximité de la dorsale de Nankaï, dans l'océan Pacifique, en 2006. Plus de dix ans d'efforts ont été nécessaires pour y observer des traces de vie à l'aide d'un microscope ! Un patient travail mené par les biologistes Hiroyuki Imachi, de l'Agence japonaise pour les sciences et technologies marines et terrestres, à Yokosuka, et Masaru Nobu, de l'Institut national des sciences et technologies industrielles avancées, à Tsukuba. Cette cellule fragile se multiplie en effet très lentement. Surtout, elle vit en étroite collaboration avec d'autres micro-organismes, car elle se nourrit de leurs produits et vice versa (1). Sa mise en culture a suscité l'enthousiasme de la communauté scientifique. Pas seulement en raison de la persévérance des chercheurs… mais aussi parce que cette petite cellule issue des profondeurs de la mer pourrait bien apporter de nouveaux indices sur l'origine de nos propres cellules, les cellules eucaryotes, qui seraient le fruit d'une association très étroite entre deux micro-organismes que l'on nomme « endosymbiose », où l'un absorbe l'autre.

Pour bien comprendre, il est nécessaire de faire un petit retour en arrière. Jusqu'à la première moitié du XXe siècle, les biologistes répertoriaient les micro-organismes en fonction de leurs formes visibles au microscope, des structures de leurs parois cellulaires et des substances qu'ils consommaient. À cette époque, le monde vivant avait été divisé en deux catégories cellulaires distinctes : d'un côté, les cellules appelées « procaryotes » (« avant le noyau ») qui ne possèdent pas de noyau, comme les bactéries ; de l'autre, celles nommées « eucaryotes » (« vrai noyau ») qui ont un noyau au sein duquel le patrimoine génétique est rangé. Cette appellation issue du grec est due au biologiste français Édouard Chatton. Il l'a inventée à la suite de l'étude, datant de 1925, de l'amibe *Pansporella perplexa,* prélevée dans le bassin d'un crocodile naturalisé au Muséum d'histoire naturelle et qu'il n'arrivait pas à classer (lire la notule du livre *Les Vies minuscules*

“La stratégie de classifier les micro-organismes par la génétique des ARNr fut un bouleversement”

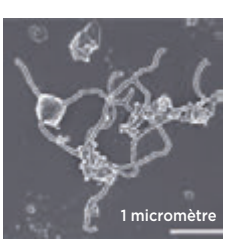
d’Édouard Chatton, p. 132). Chez les eucaryotes, on trouve les animaux, les plantes et les champignons, en plus des lignées unicellulaires. Du fait de leur complexité – leur milieu intracellulaire dispose de nombreux compartiments très spécialisés pour la fabrication et le transport des protéines, ou pour la production d’énergie –, on considère que leur apparition sur Terre est postérieure à celle des procaryotes.

D’ailleurs, les organismes pluricellulaires eucaryotes, dont nous descendons, apparaissent et se diversifient essentiellement à partir de l’explosion cambrienne, il y a « seulement » 550 millions d’années d’après les traces fossiles ! Six à huit fois plus tard que les procaryotes, présents depuis 3 ou 4 milliards d’années… Les traces fossiles les plus anciennes et les moins controversées de ces micro-organismes, sous la forme de stromatolites, ont en effet été datées à 3,5 milliards d’années (2). *« Les procaryotes ont donc évolué sur cette très longue période en un groupe extrêmement diversifié,* décrit Purificación López-García, responsable de l’unité Écologie, systématique et évolution (CNRS, université Paris-Saclay, AgroParisTech). *Ils sont si nombreux et leurs interactions chimiques avec l’environnement si variées qu’ils jouent un rôle crucial dans tous les cycles de la biosphère terrestre : le carbone, l’azote, le soufre, etc. Certains d’entre eux, comme les cyanobactéries, ont inventé, il y a 2 milliards d’années, la photosynthèse oxygénique pour obtenir de l’énergie et fabriquer de la matière organique à l’aide de la molécule d’eau (H_2O). D’autres prospèrent en oxydant des molécules inorganiques ou en décomposant de la matière organique. »* Les procaryotes se retrouvent aussi bien dans le sol que dans les océans, sous les glaces antarctiques ou dans les sources hydrothermales, et même… dans nos intestins, constituant notre microbiote !

Eucaryotes, procaryotes… Cette répartition du vivant en deux domaines séparés va pourtant exploser quelques décennies plus tard, sous le coup d’avancées techniques et conceptuelles. Tout d’abord en 1953, avec la découverte de la structure de l’ADN, composé des séquences de nucléotides (A, T, C, G) : constatant que ces séquences portent de l’information évolutive, les microbiologistes prennent conscience que les cellules des êtres vivants actuels possèdent, dans leur matériel génétique, une information essentielle sur leurs ancêtres. En effet, un gène identifié dans une cellule actuelle n’est que le variant d’un gène qui a existé il y a bien longtemps et qui, lentement, de génération en génération, s’est diversifié avec l’évolution.

De fait, la comparaison des gènes partageant une origine commune (gènes homologues) des organismes actuels permet de déterminer leur divergence et leur lien de parenté, et fournit une mesure approximative du temps écoulé depuis leur divergence à partir de leur ancêtre commun. Cette comparaison est particulièrement intéressante lorsqu’elle s’effectue à partir des séquences qui codent des fonctions essentielles à la vie cellulaire. Prenons la production de protéines par la cellule. Cette fonction est effectuée par une machinerie moléculaire (ribosome) constituée d’un assemblage de protéines et de molécules d’ARN, nommé l’ARN ribosomique (ARNr). C’est précisément en travaillant sur ces molécules chez les bactéries que le microbiologiste américain Carl Woese, professeur à l’université de l’Illinois à Urbana dans les années 1970, a fait une découverte qui allait bouleverser l’exploration des micro-organismes. Il s’est rendu compte que les séquences ADN qui codent l’ARNr changent lentement. Leur analyse et leur comparaison deviennent donc un outil idéal pour dresser l’histoire évolutive des cellules, d’autant plus que l’ARNr est présent dans chaque organisme vivant sur Terre.

Cette stratégie de classification des micro-organismes par la génétique (phylogénétique) des ARNr fut une révolution. La comparaison de ces séquences a permis de comprendre que les procaryotes se divisent en fait en deux domaines : les bactéries et les archées (3). Comme les premières, les secondes sont donc des cellules sans noyau, mais elles possèdent notamment un système de fabrication des protéines différent, qui ressemble davantage à celui des eucaryotes. Les archées ont d’abord été repérées dans des milieux



▲ *Le micro-organisme* Prometheoarchaeum syntrophicum, *cellule dont le corps rond est prolongé de filaments, a été prélevé en 2006 dans l’océan Pacifique, à 2 500 m de profondeur.*

HIRO IMACHI ET AL

extrêmes où elles étaient seules à survivre – là où, par exemple, la température, l'acidité et/ou la salinité sont élevées. Puis, petit à petit, les microbiologistes les ont dénichées dans de nombreux autres milieux naturels, y compris dans nos intestins (lire *La Recherche* n° 532, p. 55, « Un microbe inattendu qui protège nos artères »).

DRESSER DES ARBRES ÉVOLUTIFS

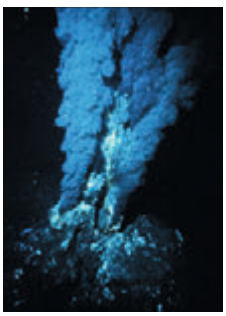
Grâce à l'étude phylogénétique des archées, des bactéries et des eucaryotes connus, les biologistes dressent des arbres évolutifs du vivant. Et ils espèrent ainsi remonter jusqu'à leur dernier ancêtre commun, baptisé Luca (pour « Last Universal Common Ancestor »). Plusieurs scénarios évolutifs ont ainsi été suggérés en vue d'expliquer le développement de ces trois familles à partir d'une cellule ancestrale commune. Certains proposent un arbre à trois branches : Luca aurait donné les bactéries, les archées et les cellules eucaryotes. D'autres pensent a contrario que les cellules eucaryotes seraient le fruit de la rencontre entre une archée et une bactérie il y a 2 milliards d'années. Cette dernière aurait été absorbée par l'archée et serait devenue une mitochondrie, son usine de production d'énergie.

Cette hypothèse a connu un regain d'intérêt en 2015. L'équipe de Thijs Ettema, à l'université d'Uppsala, en Suède, découvre alors, à partir de données génétiques provenant de sédiments marins obtenus près d'une source hydrothermale dans l'océan Arctique, que certaines archées présentent plus de caractéristiques communes avec les cellules eucaryotes que d'autres archées (4). Appelées archées d'Asgard, leurs génomes comportent plusieurs gènes que l'on pensait spécifiques aux eucaryotes. Ceux-ci sont impliqués dans des fonctions clés, comme le remodelage des membranes cellulaires. Cependant, ce constat n'était issu que de travaux d'analyse de séquences génétiques. Restait à prouver l'existence de ces étranges archées. C'est là qu'est intervenue la prouesse des biologistes Hiroyuki Imachi et Masaru Nobu. En réussissant à mettre en culture *P. syntrophicum*, *« ils ont apporté une preuve que les analyses métagénomiques à l'origine de leur identification n'étaient pas des artefacts »*, souligne Purificación López-García. Son observation au microscope a ensuite fourni de nouveaux indices sur la symbiose à l'origine de la cellule eucaryote. En effet, *P. syntrophicum* vit en étroite collaboration avec une petite bactérie de la famille des alphaprotéobactéries. Les Japonais suggèrent que cette dernière aurait été engloutie par *P. syntrophicum*. *« L'hôte devait partager des métabolites dérivés d'acides aminés (par exemple, pyruvate, 2-oxobutyrate) avec la bactérie qui, en retour, respirait de l'oxygène et fournissait à son hôte des éléments constitutifs qu'il ne pouvait pas synthétiser,* explique encore la biologiste. *Deux étapes supplémentaires ont permis de convertir cette association en cellule eucaryote : l'acquisition d'un transporteur d'ATP (*) produit par la bactérie respirant l'oxygène et le remplacement des lipides de la membrane de l'archée par des lipides bactériens. »*

Autre exemple, l'équipe de Purificación López-García et celle de Karim Benzerara (Institut de minéralogie, de physique des matériaux et de cosmochimie, Sorbonne Université, CNRS, IRD, MNHN) ont isolé une nouvelle espèce de cyanobactérie associée à un tapis microbien sur des roches sédimentaires situées dans un lac alcalin, le lac d'Alchichica, au Mexique. *« Nous avons découvert que cette bactérie,* Gloeomargarita lithophora, *est capable de former des granules de carbonate intracellulaires,* témoigne Purificación López-García (5). *C'est la première fois qu'on identifie une cyanobactérie avec ces capacités de biominéralisation interne. Mais* Gloeomargarita *a dévoilé d'autres surprises. En effet, on a pu démontrer que les chloroplastes des algues et des plantes terrestres, des organites où se fait la photosynthèse et qui dérivent des anciennes cyanobactéries endosymbiotes, ont la lignée des Gloeomargarita comme plus proches parents !* (6) » Ces travaux, ainsi que beaucoup d'autres, témoignent de l'intérêt de continuer à explorer la biodiversité des micro-organismes pour remonter notre évolution. L'exploration du monde microbien apportant de nouveaux éclairages sur les scénarios du vivant. En espérant que celui-ci ne se dégrade pas trop vite. ■

Mathias Germain

(1) H. Imachi *et al., Nature, 577,* 519, 2020.
(2) R. J. Baumgartner *et al., Geology, 47,* 1039, 2019.
(3) C. R. Woese et G E. Fox, *PNAS, 74,* 5088, 1977.
(4) A. Spang *et al., Nature, 521,* 173, 2015.
(5) E. Couradeau *et al., Science, 336,* 459, 2012.
(6) R. I. Ponce-Toledo *et al., Curr. Biol., 27,* 386, 2017.



▲ *Les cheminées hydrothermales (ici, un fumeur noir dans l'océan Atlantique) sont riches en micro-organismes anciens.*

OAR/NATIONAL UNDERSEA RESEARCH PROGRAM (NURP)/ NOAA

(*) L'ATP (adénosine triphosphate) est une molécule qui libère son énergie en se convertissant en ADP (adénosine diphosphate).

Entretien avec **Jean-Pierre Bibring**

« La vie serait intimement liée à l'évolution de la Terre »

La diversité et la complexité mises au jour dans les molécules organiques du Système solaire pourraient laisser penser que la vie a commencé dans l'espace, et qu'elle serait commune dans le cosmos. Rien de tout cela pour Jean-Pierre Bibring ! L'astrophysicien français estime au contraire que seules de multiples contingences – dont beaucoup nous échappent encore – ont permis à l'évolution physico-chimique d'emprunter cette complexité des chemins : l'universalité de la vie telle qu'on la pensait il y a quelques décennies serait remise en cause.

▶ Encelade, lune de Saturne dont s'échappent des geysers d'eau, est l'un des astres qui suscitent le plus d'intérêt pour y rechercher de la vie (image prise par la sonde Cassini de la Nasa). Mais la vie a-t-elle pu naître ailleurs que sur Terre ?

NASA/JPL CALTECH

Jean-Pierre Bibring
ASTROPHYSICIEN
Professeur émérite à l'université Paris-Saclay, il mène ses recherches à l'Institut d'astrophysique spatiale.

Il a été responsable scientifique de l'atterrisseur européen Philae de la mission Rosetta et il collabore à la mission japonaise Hayabusa 2.

La Recherche **Les chercheurs ont trouvé dans l'espace beaucoup de molécules organiques, parfois très complexes. La vie aurait-elle donc pu apparaître ailleurs que sur Terre ?**

Jean-Pierre Bibring Depuis des décennies, on découvre des molécules complexes à base de carbone, non seulement dans le Système solaire, mais également dans le milieu interstellaire. Parmi elles, on trouve des acides aminés. Récemment, une équipe internationale a montré que l'on pouvait former l'un de ces acides aminés, la glycine, dans des conditions « froides », à basse température. Ces chercheurs prétendent ainsi que des molécules dites prébiotiques *[avant l'apparition de la vie, NDLR]* sont présentes dans de nombreux environnements, sans nécessiter un apport d'énergie aussi élevé qu'on le pensait jusqu'alors (1). Est-ce une indication que des formes de vie peuvent exister dans l'espace, ailleurs que sur Terre ? Je ne crois pas qu'il faille voir une causalité, qui traduirait une forme de déterminisme, entre l'existence de certains composés moléculaires et « l'émergence » du vivant qui en résulterait. Le terme même de molécules prébiotiques est biaisé, insinuant que ces molécules seraient le prélude de la vie.

C'est pourtant l'idée qui prévalait : avec une « soupe primitive » d'ingrédients et de l'énergie, la vie devrait apparaître ?

En effet, mais cette idée d'un processus générique d'évolution aboutissant nécessairement à la vie, qui a encore ses adeptes, peut être aujourd'hui mise en cause par l'enseignement de nombreuses découvertes astronomiques : l'exploration spatiale des planètes du Système solaire et la caractérisation de milliers d'exoplanètes révèlent un très haut degré, insoupçonné, de diversité. Ces découvertes exigent de repenser les processus qui en ont sculpté les évolutions. De multiples contingences y ont joué un rôle clé, ce qui pourrait concerner également l'évolution chimique vers le vivant.

Les expériences du type Miller-Urey qui consistent à dire qu'il est possible de fabriquer une grande variété de molécules complexes – et, pourquoi pas, la vie – en prenant de petits composés et en fournissant de l'énergie ne vous convainquent pas ?

Que ces expériences fabriquent une grande variété de molécules est indéniable. Mais cette chimie pose plusieurs questions. La première est celle de leur sélectivité : dans certaines d'entre elles, d'innombrables acides aminés sont synthétisés, bien au-delà de la vingtaine que l'on retrouve dans l'ensemble du vivant terrestre. Comment le choix s'est-il opéré ? N'y a-t-il pas eu, dans le mélange initial, des propriétés favorisant une orientation particulière ? Un autre choix réactionnel aurait-il permis la synthèse de catalyseurs équivalents à ceux qui, sur Terre, ont permis de former ces protéines spécifiques, donnant un sens à la notion de code génétique, décodable et traduisible en fonctions organiques ? Enfin, comment régler le problème de « l'émergence » de la vie à partir de non-vivant sans recourir à la génération spontanée ou au créationnisme ? Ne pourrait-on pas emprunter pour « l'origine » de la vie une approche similaire à celle qui concerne « l'origine » de l'humain, dont on sait désormais qu'elle a procédé non d'une émergence discrète, mais d'un continuum d'étapes, chacune influencée par l'évolution contingente de l'environnement ?

Pouvez-vous préciser votre idée ?

L'extraordinaire diversité des mondes planétaires et exoplanétaires bouscule les paradigmes. Elle force à reconsidérer les processus qui ont fait que la Terre est devenue la Terre, différente des autres planètes, elles-mêmes différentes entre elles.

DRFP/LEEMAGE

Une planète ne se définit donc pas seulement comme un objet d'une certaine masse à une distance donnée de son étoile ?

Exactement. De multiples facteurs ont joué un rôle dans son évolution : contenu radioactif, qui entretient l'activité interne ; paramètres des collisions géantes primordiales ; effets majeurs de la Lune, qui en est résultée ; tectonique des plaques très particulière… Non seulement la Terre est unique, mais chaque objet dans l'espace l'est. Ce qui est nouveau n'est pas tant la réponse à la question : « La Terre est-elle unique ? », que la question elle-même, de ce qui caractérise la Terre et de la diversité des phénomènes qui en ont sculpté les propriétés (lire p. 46). Le vivant ne serait-il que l'une des propriétés particulières de cette évolution singulière ? Ne serait-il pas intimement lié aux conditions spécifiques qui ont forgé l'évolution de la Terre ?

Qu'est-ce que Rosetta et son atterrisseur Philae nous ont permis d'apprendre ?

L'un des principaux enseignements, c'est que l'essentiel du noyau des comètes n'est pas constitué d'eau, comme on l'a longtemps pensé (Fred Whipple les qualifiait de *« boules de neige sale »*), mais de grains organiques mesurant jusqu'à plusieurs millimètres, qui regorgent d'une très grande richesse moléculaire. Ils ont été formés dans l'effondrement même du nuage protosolaire qui a donné naissance aux planètes, par une chimie spécifique. Des comètes dans un autre système stellaire n'auraient sans doute pas le même contenu moléculaire, car résultant de réactions chimiques distinctes, stimulées par un rayonnement stellaire distinct. C'est par exemple le cas d'un rayonnement particulier de l'étoile en formation, pouvant créer des excès de chiralité (*) particuliers dans les molécules produites, qu'on peut appeler « forçage sélectif », orientant vers le vivant (les molécules du vivant sont caractérisées par une homochiralité particulière). Plus généralement, une première étape de « forçage » sélectif, contingent, du contenu moléculaire serait donc à rechercher dans les dernières étapes de l'évolution du nuage protosolaire.

(*) **Deux molécules sont chirales** si elles ne sont pas superposables à leur image dans un miroir.

Vous en revenez aux spécificités de ces évolutions variées ?

Il me semble que c'est la bonne approche. Un autre ensemble de conditions aurait conduit à un autre ensemble de composés moléculaires, à l'origine d'une tout autre évolution : rien ne dit qu'elle aurait obéi aux « principes évolutifs » que l'on reconnaît aux structures vivantes terrestres. Celles-ci ont puisé, au sein du mélange moléculaire initial, des composés sur lesquels s'est fondée une évolution singulière, darwinienne. Quels étaient-ils ? En quoi étaient-ils si spécifiques ? Comment le déterminer ? Pour le savoir, il faut pouvoir analyser, en laboratoire, des échantillons de matière carbonée la plus primordiale possible.

C'est l'un des enjeux du programme japonais Hayabusa 2, qui a réalisé avec succès un retour d'échantillons de l'astéroïde carboné Ryugu. On a toutes les raisons de penser que la matière carbonée qu'il contient est très semblable à celle que l'on a observée sur la comète Tchourioumov-Guerassimenko. La collecte a été réalisée sur Ryugu à deux reprises, en 2019. Le 5 décembre dernier, la capsule avec les échantillons de matière de l'astéroïde s'est posée en Australie. Le matériau est dorénavant stocké dans un laboratoire à Tokyo. À partir de janvier, nous analyserons ces échantillons.

Cela permettra-t-il d'avancer sur ces points ?

C'est ce que nous espérons : une fois que l'on aura identifié les grains riches de matière carbonée, s'il en existe bien, on pourra les analyser pour en identifier les phases minéralogiques, les molécules et macromolécules organiques principales et, par exemple, déterminer si elles présentent des excès de chiralité, caractéristiques du vivant. Avec ce retour d'échantillons, nous disposerons pour la première fois d'un matériau primordial dont l'origine a été identifiée et dont on devrait pouvoir déterminer le degré de spécificité. Cela devrait constituer, à mon avis, une étape fondamentale pour évaluer les facteurs contingents qui ont jalonné l'évolution qui mène – ou non – vers le vivant. ■

Propos recueillis par Philippe Pajot

(1) S. Ioppolo *et al., Nat. Astron.*, doi:10.1038/s41550-020-01249-0, 2020.

« L'enjeu est de disposer de matière carbonée primordiale dont l'origine a été identifiée »

Jupiter, maître de l'eau ?

Parmi les plus de 4 000 astres identifiés qui tournent autour d'une étoile autre que le Soleil, certains seraient-ils susceptibles d'abriter la vie ? C'est ce que les chercheurs veulent établir. Plusieurs conditions à cela : que l'exoplanète soit située à la bonne distance de son étoile afin que l'eau liquide puisse y exister, mais aussi que de l'eau ait été apportée lors de sa formation. L'analyse de l'histoire du Système solaire explique comment cela a pu se dérouler dans notre coin d'Univers et le rôle clé qu'a joué Jupiter.

Sean Raymond
CHARGÉ DE RECHERCHE CNRS, LABORATOIRE D'ASTROPHYSIQUE DE BORDEAUX
Spécialiste de la formation des planètes dans les systèmes planétaires solaires et extrasolaires, il est l'auteur du blog planetplanet.net.

Avec son cortège de planètes – quatre rocheuses (Mercure, Vénus, la Terre, Mars), les plus proches du Soleil, et quatre gazeuses (Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune), plus éloignées –, notre Système solaire est-il commun ou rare dans l'Univers ? De la réponse à cette question dépendent les considérations sur l'ubiquité du vivant, à savoir si des formes de vie pourraient exister ailleurs. Pour la première fois dans l'histoire de l'astronomie, nous disposons de données pour y répondre. Nous savons désormais que quasiment toutes les étoiles voient des planètes graviter autour d'elles. Et également que la configuration de notre Système solaire est plutôt rare. Comment expliquer ce paradoxe ?

Pour comprendre, imaginons que nous soyons les habitants d'un astre situé à quelques centaines d'années-lumière de la Terre et pointons nos instruments vers le Soleil. Avec la meilleure sensibilité actuelle, nous serions en mesure de repérer uniquement Jupiter, la plus grosse des planètes gazeuses. En effet, les exoplanètes se révèlent aux astronomes par les petites oscillations qu'elles induisent sur l'étoile autour de laquelle elles orbitent : plus une planète est grosse et proche de l'étoile, plus les oscillations sont importantes. Avec les données dont nous disposons sur les systèmes stellaires qui nous entourent – nous en connaissons actuellement plus de 3 000 –, nous savons désormais qu'environ 10 % des étoiles comme notre Soleil sont elles aussi accompagnées d'une planète géante semblable à Jupiter. Mais une planète analogue à Jupiter et sur une orbite semblable ne se rencontre que dans… 1 % des étoiles de type solaire. Par ailleurs, comme seulement 10 % des étoiles sont de ce type, on aboutit ainsi à un système exosolaire dont la fréquence est de 1 pour 1 000 seulement. Pas si commun, donc !

LA MISSION EUROPÉENNE PLATO

Autre particularité : la présence de Jupiter a un lien avec la quantité d'eau que contient la Terre. Notre planète n'est, en effet, pas très riche en eau. Bien que 70 % de sa surface soit recouverte d'océans, elle ne contient que 0,1 % d'eau (en masse), partagée entre la surface et le manteau. Le scénario de formation des astres du Système solaire fondé sur les simulations, et sur l'étude des météorites et des comètes, permet d'expliquer ce statut particulier. Sans entrer dans les détails, il faut savoir que Jupiter y joue un rôle clé en croissant et en accrétant rapidement du gaz dans le disque du Système solaire en formation. Cela a pour effet de bloquer les objets riches en eau qui auraient pu apporter beaucoup de ce précieux liquide en s'écrasant sur notre proto-Terre. Autrement dit, sans Jupiter et sa croissance particulière, la Terre aurait vraisemblablement contenu bien plus d'eau et serait peut-être devenue une planète océan. Ainsi, dans notre Galaxie, ce sont donc les systèmes exoplanétaires avec une étoile de type solaire et une exoplanète de type Jupiter qui, bien qu'assez rares, paraissent les plus susceptibles d'abriter une exo-Terre. Pourra-t-on en détecter directement ?

La prochaine grande étape sera le satellite européen Plato, dont l'objectif est précisément la caractérisation d'astres de type terrestre situés à des distances de leur étoile telles que l'eau y existe à l'état liquide. Ces observations nous diront si, avec ses océans peu profonds, la Terre est rare ou typique. Et elles nous informeront même sur la source de notre eau et pourront nous dire si Jupiter a vraiment joué le rôle d'architecte du Système solaire. Rendez-vous à partir de 2026, date prévue pour son lancement. ■

LAURENCE HONNORAT

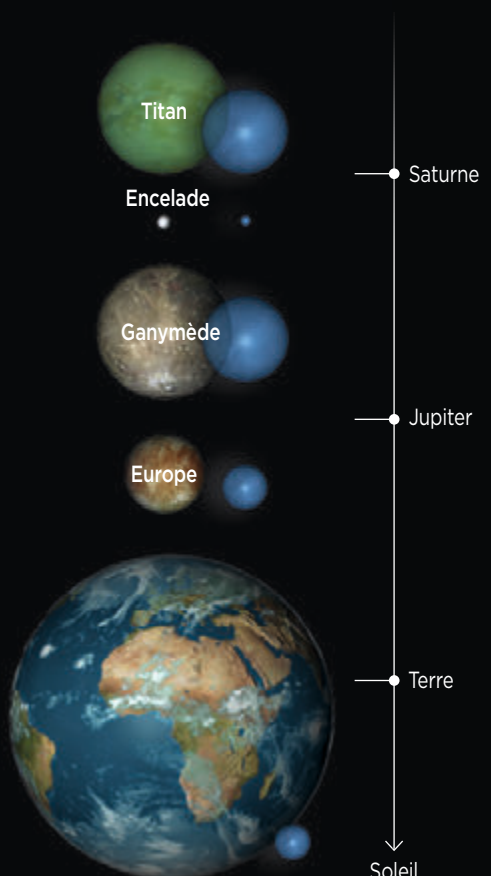
QUATRE LUNES GLACÉES À EXPLORER

Longtemps, la vie n'a été envisagée que dans une zone étroite, ni trop lointaine ni trop proche de l'étoile du système considéré, où l'eau est liquide : trop froids, les petits corps du Système solaire seraient donc inhospitaliers. Des observations ont pourtant révélé que des astres comme Pluton pouvaient abriter un océan sous de la glace. Des missions spatiales programmées vers des lunes de Saturne et de Jupiter devraient enrichir le bestiaire des molécules complexes qu'on y trouve. Et peut-être, à terme, révéler une vie microscopique.

Texte : Philippe Pajot, avec Gabriel Tobie, du LPG (université de Nantes, université d'Angers, CNRS). Infographie : Bruno Bourgeois

UNE FORTE PROPORTION D'EAU LIQUIDE, COMPARÉ À LA TERRE

Si la molécule d'eau est abondante dans l'Univers, l'eau sous forme liquide ou solide est plus rare. Dans les lunes glacées – satellites dont la surface est essentiellement constituée de glace – de Saturne et de Jupiter, la quantité d'eau à l'état liquide en proportion du volume de la planète (représentée ci-contre par les boules bleues) excède souvent 10 % et peut même dépasser 40 %, notamment sur Encelade. Sur Terre, l'eau à l'état liquide occupe une couche très superficielle, ce qui fait que cette fraction est faible (0,12 %).



TITAN

Notre connaissance de cette lune de Saturne, seul satellite du Système solaire à posséder une atmosphère épaisse, a été bouleversée par son exploration à l'aide de la mission américaine Cassini-Huygens en 2004. Perçu comme un équivalent froid (-179 °C) de la Terre primitive, cet astre de roche et d'eau glacée comprend en fait en surface des lacs d'hydrocarbures liquides.

MOLÉCULES

Le méthane (CH_4) se trouve en quantité au niveau du sol et dans l'atmosphère. À la surface, beaucoup de molécules organiques dérivées du méthane sont détectées, sous formes gazeuse, liquide et solide.

MISSION

La sonde américaine Dragonfly devrait rechercher à la surface des molécules organiques complexes qui pourraient constituer des premières briques du vivant. Lancement prévu en 2027, arrivée en 2034.

ENCELADE

De spectaculaires jets de vapeur fusent de cette petite lune de Saturne : le fond de son océan souterrain est criblé de cheminées hydrothermales qui font fondre la glace et permettent à l'eau salée de jaillir. Cela en fait l'un des lieux les plus prometteurs pour y rechercher de la vie extraterrestre. C'est le seul astre dont on a une bonne idée de la structure : sa couche de glace de surface ferait 2 à 5 km de profondeur seulement au niveau du pôle Sud, là où jaillit l'eau.

MOLÉCULES

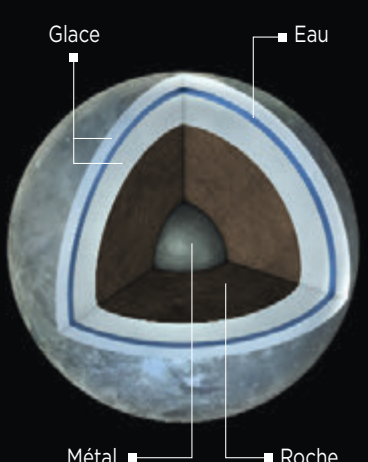
Dans les panaches de vapeur du pôle Sud, les instruments de la sonde américaine Cassini-Huygens, lancée en 1997, ont détecté du dioxyde de carbone (CO_2), du méthane (CH_4), de l'ammoniac (NH_3) et de l'hydrogène moléculaire (H_2). Mais également des molécules organiques plus complexes non identifiées encore, ainsi que des sels de sodium et de potassium.

MISSIONS

Différents projets ont été proposés par la communauté scientifique à la Nasa et à l'ESA, l'agence spatiale européenne. Certains sont en cours d'évaluation, mais aucune décision n'a été prise.

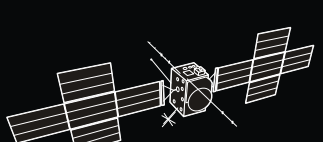
GANYMÈDE

Plus grosse lune du Système solaire, ce satellite de Jupiter est le seul à posséder un champ magnétique généré dans son noyau mantellique, de manière similaire à la Terre ou à Mercure. La présence d'un océan liquide à l'abri sous une croûte de 100-150 km de glace a également été révélée grâce à l'analyse de l'induction magnétique due aux fluctuations du champ magnétique de Jupiter.



MOLÉCULES

Comme sur Europe, on y détecte du CO_2 et des sels en surface, mais en quantité moindre. On y voit surtout un composé sombre (expliquant son aspect foncé), mais qui n'a pas encore été identifié.



MISSION

Prochaine grande mission d'exploration européenne, la sonde Juice sera lancée en 2022 vers le système de Jupiter, qu'elle étudiera dès la fin de 2029. En 2032, elle se mettra en orbite autour de Ganymède.

EUROPE

Un peu plus petit que la Lune, ce satellite de Jupiter, fait de roche et de glace et dont le noyau est sans doute métallique, a peu de relief. Entre 10 et 30 km de profondeur, il renfermerait un océan d'eau salée. L'eau resterait liquide par un effet de marée dû à son orbite légèrement excentrique. L'éruption d'eau salée en surface expliquerait la présence de dépôts de sels. Comme sur Encelade, des jets de vapeur témoignent d'une activité sous-glaciaire.

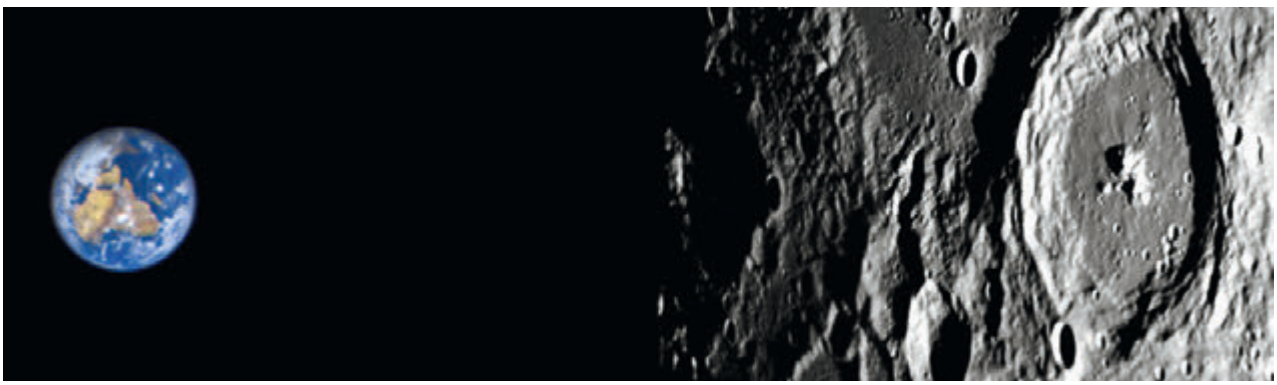
MOLÉCULES

On trouve essentiellement du carbone sous forme de CO_2 en surface et des sels de sulfates, mais également des chlorures.

MISSION

La sonde américaine Europa Clipper effectuera 45 survols de cette lune glacée à partir de 2028-2029 (lancement prévu en 2024). L'atterrisseur Europa Lander devrait être lancé quelques années après, à la recherche d'indices d'activité biologique à sa surface.

NASA - INFOGRAPHIES : BRUNO BOURGEOIS



▲ *L'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre – donc le climat – est stabilisée par la Lune : cela a-t-il favorisé le développement de la vie ?*

Notre planète est-elle vraiment unique ?

Le seul exemple connu de vie se situe sur Terre. Si l'espoir est fort que notre Galaxie puisse contenir des milliards d'astres en abritant également, les caractéristiques de notre planète pourraient en faire un lieu très particulier de l'Univers, seul propice à l'apparition et au maintien du vivant. Grâce à des modélisations numériques du climat des planètes, des scientifiques tentent de savoir si la vie sur Terre est un phénomène unique, rare… ou bien banal.

François Forget
PLANÉTOLOGUE
Directeur de recherche CNRS, il travaille à l'Institut Pierre-Simon-Laplace, à Paris.

Depuis 1995 et la découverte de la première planète extrasolaire par les astrophysiciens suisses Michel Mayor et Didier Queloz, nous vivons une révolution scientifique sans précédent : nous n'avons cessé de recenser des milliers de ces exoplanètes. Nous estimons même que la plupart des étoiles de notre Galaxie sont entourées de planètes – mieux, de planètes rocheuses, comme la Terre. Ainsi, ce sont des centaines de milliards d'autres mondes qui nous entourent. L'esprit nourri par des décennies de science-fiction, comment ne pas en conclure que les extraterrestres sont là, à portée de télescope ? Las ! Il faut peut-être réfréner notre imagination. Il n'est pas impossible, en effet, que la combinaison de processus qui a permis à la Terre de se couvrir de vie et de se peupler d'êtres conscients ait été statistiquement… improbable. Au point que notre planète puisse être quasiment unique.

Certes, cette hypothèse est difficile à accepter. Elle est à la fois effrayante – nous serions donc seuls ? – et en contradiction avec les principes d'objectivité qui incitent tout scientifique moderne à écarter l'idée que la Terre puisse être « spéciale ». Car nous souhaitons éviter les erreurs qui ont poussé les savants d'autrefois à placer la Terre au centre de l'Univers et il semble « chauvin » de lui conférer des qualités particulières. Pourtant, il ne serait pas fortuit que nous soyons sur une planète exceptionnelle car, justement, nous en sommes le produit ! Ce concept peut être qualifié de « principe anthropique planétaire (*) ». S'il nous est difficile de nous rendre compte du fait que la Terre est particulière, c'est parce que l'essentiel de nos connaissances en géophysique et en climatologie a été acquis depuis ce monde spécifique. Notre compréhension de l'Univers en est inévitablement biaisée.

C'est d'ailleurs l'une des leçons que nous a enseignées la découverte des exoplanètes. Auparavant, il était acquis que l'architecture du Système solaire – caractérisé par des orbites circulaires, des planètes rocheuses près du Soleil et des géantes gazeuses à l'extérieur – était le fruit de processus universels et inévitables. Les observations récentes nous

PIERRE KITMACHER - NASA

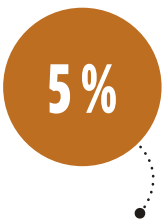
ont révélé qu'au contraire, cette structure semble rare dans notre région de la Galaxie, où l'on trouve davantage, par exemple, de planètes géantes gazeuses proches de leur étoile.

Qu'en est-il, spécifiquement, de la Terre ? Ce qui la caractérise par rapport aux autres mondes que nous connaissons, c'est la présence ininterrompue d'eau liquide à sa surface pendant l'essentiel de son existence, soit plus de 4 milliards d'années. Or la vie telle que nous la connaissons – et telle que nous pouvons l'imaginer – se fonde sur la chimie du carbone dans l'eau liquide. Des processus chimiques ont pu transformer l'environnement en exploitant intensivement le rayonnement solaire grâce à la photosynthèse *[réaction biochimique énergétique chez les plantes, NDLR]*, qui n'est possible qu'en surface. Est-il si difficile pour une planète de maintenir de l'eau, sous forme d'océans, à sa surface ? Pour le savoir, faisons l'expérience virtuelle de déplacer la Terre dans notre Système solaire et d'en modéliser le climat à l'aide d'une simulation numérique. Les résultats sont surprenants ! Si nous rapprochons notre planète du Soleil de 5 %, l'accroissement de l'insolation tend à évaporer l'eau à la surface et la proportion de vapeur d'eau dans l'atmosphère augmente. Cela accroît considérablement l'effet de serre et amplifie d'autant l'évaporation. Dès lors, le climat s'emballe : les océans se vaporisent inexorablement et l'eau liquide disparaît de la surface de la planète, comme ce fut le cas sur Vénus. À l'inverse, si l'on éloigne la Terre du Soleil de 5 %, la légère baisse du flux solaire entraîne une baisse globale des températures, avec pour effet d'augmenter la surface couverte par les glaces et la neige. Ces surfaces brillantes réfléchissent alors le rayonnement solaire et amplifient le refroidissement de notre planète : partout, l'eau liquide se transforme en glace.

UN THERMOSTAT GÉOPHYSIQUE

Ces résultats suggèrent que la Terre semble être exactement à la bonne distance du Soleil. Surtout, ils attestent que toute planète couverte d'eau peut être sujette à des instabilités climatiques irréversibles, par exemple lorsque la luminosité de son étoile change. Or la modélisation de l'évolution des étoiles montre que la luminosité solaire a varié de plus de 25 % depuis que la vie est apparue sur Terre. Dès lors, une autre question se pose : comment notre planète a-t-elle pu s'en sortir ? En fait, il existe sur Terre des mécanismes régulateurs du climat. Par exemple, le gaz carbonique (CO_2) de l'atmosphère est dissous en permanence par l'eau de pluie, qui ruisselle sur les continents. Transporté dans les océans, ce CO_2 réagit avec les autres produits du lessivage des continents (silicates de calcium et magnésium) et forme des roches calcaires sur le plancher océanique. Si la luminosité solaire devenait faible, cette disparition du CO_2 et de son effet de serre serait fatale au climat tempéré de la Terre. Heureusement, il existe le phénomène de la tectonique des plaques ! Celui-ci fait en permanence glisser le plancher océanique sous les continents. Là, le CO_2 gazeux est reformé et recyclé dans l'atmosphère via les volcans. À l'échelle géologique, ce cycle dit « des carbonates-silicates » contrôle la quantité de CO_2 atmosphérique et son effet de serre. Ainsi, si la Terre se couvrait de glace – ce qui semble être arrivé brièvement au cours de l'histoire à plusieurs reprises –, le CO_2 issu des volcans s'accumulerait dans l'atmosphère, sans pouvoir se dissoudre dans l'eau gelée. En quelques centaines de milliers d'années, l'effet de serre associé ferait fondre la glace et la Terre serait sauvée… Notre planète bénéficie donc bien d'un thermostat géophysique grâce à la tectonique des plaques. Ce phénomène est-il probable sur les autres planètes ? Pas dans notre Système solaire en tout cas, où il est établi que seule la Terre en bénéficie. Pour les planètes extrasolaires, le mystère demeure.

D'autres particularités rares de la Terre ou du Système solaire pourraient avoir joué un rôle déterminant dans le développement de la vie sur notre planète : la présence d'une grosse Lune qui stabilise l'inclinaison de l'axe de rotation – et donc le climat – et un champ magnétique planétaire fort, qui nous protège des particules énergétiques chargées. Pour l'instant, nous pouvons juste nous interroger sur la somme improbable de coïncidences apparemment requises pour créer sur Terre un environnement favorable à la vie. L'enquête continue. Bientôt, de nouveaux télescopes vont caractériser les exo-atmosphères, voire des exo-océans. À terme, on peut imaginer détecter un environnement exoplanétaire si modifié par une biologie active que l'existence de la vie puisse y être démontrée. Pour cela, il faudra qu'une « autre Terre » propice à la vie soit présente parmi les systèmes observables dans notre voisinage galactique. Nous aurons alors à accepter l'idée que notre Terre n'a rien d'exceptionnel… ■



EN PROCÉDANT À UNE SIMULATION et en modélisant le climat, si l'on approche la Terre du Soleil de 5 % ou, à l'inverse, on l'en éloigne d'autant, on voit que l'eau à l'état liquide disparaît de la surface du globe. Notre planète semble donc être exactement à la bonne distance du Soleil pour que la vie ait pu apparaître.

(*) **Le principe anthropique** au niveau cosmologique a été proposé en 1974 par l'astrophysicien Brandon Carter pour exprimer le fait que les propriétés de l'Univers doivent être compatibles avec notre présence.

Une soupe primitive reproduite en laboratoire

Une partie de la chaleur interne de la Terre est évacuée le long des dorsales océaniques sous forme de geysers, appelés les « sources hydrothermales ». L'abondance de la faune et de la flore dans ces oasis des profondeurs montre que ces dernières auraient joué un rôle clé dans la formation des briques élémentaires du vivant en fournissant une grande partie des ingrédients nécessaires. Des expériences, lancées en ce début d'année, visent à reproduire les réactions qui s'y seraient déroulées il y a 4 milliards d'années.

ESRF/PIERRE JAYET

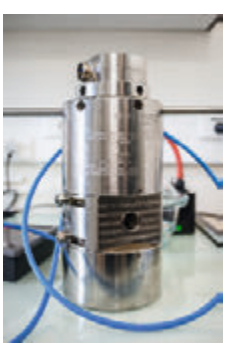
▲ *L'European Synchrotron Radiation Facility (ESRF), à Grenoble, est le premier synchrotron de 4e génération, où pourront être analysées les réactions obtenues dans un dispositif unique au monde, mis au point à l'Institut Néel.*

Directeur de recherche au CNRS et à l'Institut Néel à Grenoble, Jean-Louis Hazemann ne cache pas son impatience : *« C'est un travail de longue haleine. Mais huit ans après les premières discussions, nos expériences visant à reproduire des réactions qui se seraient déroulées il y a 4 milliards d'années dans les profondeurs océaniques vont enfin pouvoir débuter. »* Même si l'épidémie de Covid-19 a retardé de près d'un an les travaux qu'il dirige, les conditions semblent enfin réunies pour un démarrage début avril… si tout se passe comme prévu.

La pièce maîtresse est prête, quant à elle, depuis janvier 2020 : un autoclave de forme cylindrique d'environ 30 kg, qui mesure 45 cm de haut pour 15 cm de large. Fruit de longues années de recherches, ce réacteur en acier inoxydable peut générer des pressions allant jusqu'à 1 000 bars et des températures frisant les 1 000 °C ! Et reproduire ainsi toute une palette de conditions régnant au cœur des sources hydrothermales. Ces très nombreux systèmes qui se situent à des profondeurs allant de 700 à 5 000 m évacuent sous forme de geysers une partie de la chaleur interne de la Terre le long des dorsales océaniques, ces failles qui se sont créées aux zones de jonction des plaques tectoniques. Dans ces eaux chaudes de l'océan primordial, elles auraient joué un rôle clé dans la formation des briques élémentaires du vivant, malgré une pression pouvant dépasser 550 bars et une température allant jusqu'à 400 °C. *« Très peu d'expériences ont permis d'étudier les processus réactionnels qui se déroulent dans ces milieux très particuliers et si difficiles d'accès,* souligne Jean-Louis Hazemann. *Or, la nôtre est unique au monde. Grâce à des dispositifs innovants et des instruments de pointe, comme le premier synchrotron de 4e génération récemment mis en service à l'European Synchrotron Radiation Facility (ESRF) à Grenoble, nous pourrons analyser ces réactions avec une sensibilité jamais atteinte auparavant. »*

La découverte des sources hydrothermales, au milieu des années 1970 au large des îles Galápagos, dans le Pacifique, a très vite suscité l'enthousiasme auprès des chercheurs travaillant sur les origines de la vie. Elle a eu lieu une vingtaine d'années après les fameuses expériences conduites par l'Américain Stanley Miller à l'université de Chicago. Cherchant à reproduire les conditions – notamment atmosphériques – de la Terre primitive, le jeune chimiste avait enfermé de l'eau, de l'ammoniac, du méthane et du dihydrogène à l'intérieur d'un ballon avant de soumettre ce mélange à des arcs électriques simulant l'effet des éclairs. Il avait ainsi obtenu, au bout de quelques jours, une variété de composés organiques, c'est-à-dire à base de carbone, essentiels à la chimie du vivant : de l'urée, du formaldéhyde et de l'acide cyanhydrique, mais aussi divers acides aminés tels que la glycine et l'alanine, qui constituent les protéines. Ces travaux popularisèrent ainsi la notion de « soupe primitive », tout comme l'idée que les composés organiques se seraient formés spontanément, de façon abiotique, à partir d'espèces inorganiques ayant réagi ensemble.

Plusieurs critiques furent néanmoins adressées à ces expériences. Elles concernaient plusieurs facteurs : la teneur en dihydrogène, trop élevée par rapport à l'atmosphère primitive ; la dispersion et l'hydrolyse des composés organiques dans l'étendue des milieux aqueux ; ou encore les très faibles quantités des produits dits « réactionnels » – les acides aminés notamment. Or la découverte des sources hydrothermales changeait soudain la donne en permettant de lever certaines de ces objections et en présentant plusieurs caractéristiques remarquables. Ces geysers constituent en effet des « oasis » abritant entre 10 000 et 100 000 fois plus de biomasse (microbes, crustacés, etc.) que le reste du domaine abyssal. Ils éjectent surtout, dans les volutes d'eau, tous les ingrédients des expériences de Miller : du dihydrogène, de l'ammoniac et plusieurs sources de carbone comme le méthane, le gaz carbonique et le monoxyde de carbone, auxquels s'ajoute une variété de métaux (lithium, manganèse, zinc…) pouvant servir de catalyseurs aux réactions chimiques.

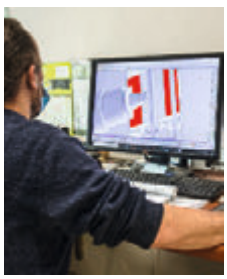


▲ *Dans ce réacteur en acier inoxydable de l'Institut Néel à Grenoble, dont il n'existe qu'un seul exemplaire, peuvent régner des températures grimpant jusqu'à 1000 °C et des pressions de 1000 bars.*

PABLO CHIGNARD

DE NOMBREUX SCÉNARIOS ENVISAGÉS

Les débits sont par ailleurs très élevés et souvent continus dans ces réacteurs naturels qui existent par milliers, permettant de synthétiser d'importantes quantités de composés organiques, contrairement aux expériences de Miller. Ces milieux sont également très riches en minéraux associant du fer et du soufre, *« agrégats atomiques que l'on retrouve dans de nombreuses protéines biologiques, comme*



▲ *Une large gamme de paramètres réactionnels peuvent être modulés à l'intérieur de l'autoclave.*

les déshydrogénases, et pourrait ainsi provenir des systèmes hydrothermaux », indique François Guyot, biominéralogiste au Muséum national d'histoire naturelle, à Paris. Autre argument en faveur du rôle clé des sources hydrothermales : le métabolisme des archées – l'une des branches les plus anciennes du vivant – et de la plupart des bactéries ne repose pas sur la photosynthèse : il n'a pas besoin de la lumière du Soleil pour y puiser son énergie. Elles auraient donc pu émerger dans l'environnement de ces geysers océaniques où règne une obscurité totale.

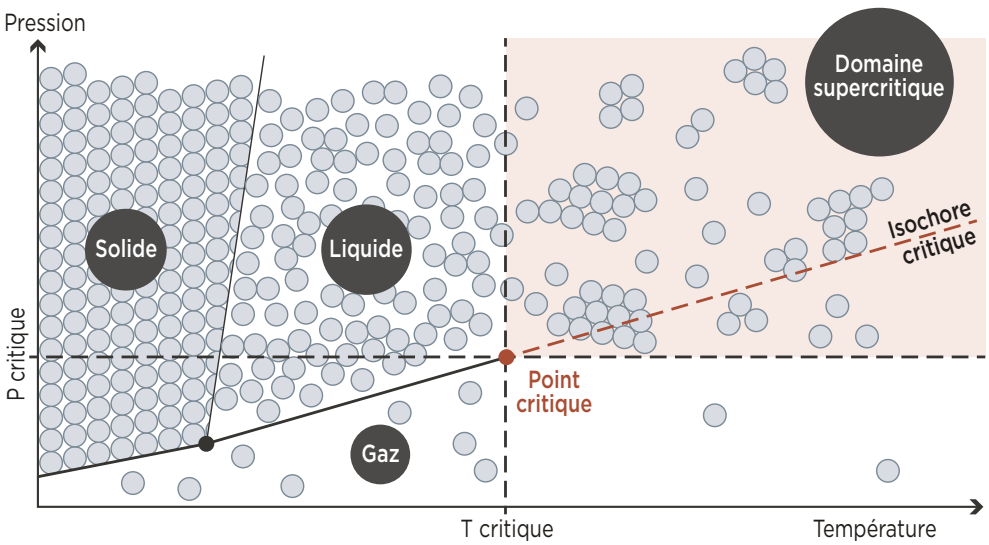
Il n'existe toutefois aucun consensus sur les milieux et conditions physicochimiques qui auraient engendré les premières formes de vie et fabriqué ces fameuses briques du vivant. *« On peut très bien imaginer qu'une combinaison de scénarios a alimenté la chimie prébiotique dans des lieux et des temporalités très différents : hydrothermalisme des profondeurs mais aussi de surface, du type de ce que l'on trouve dans le supervolcan Yellowstone (États-Unis) ; des surfaces rocheuses asséchées ou au contraire englouties ; de la photochimie atmosphérique ; des apports des comètes et des astéroïdes, etc. »*, note Marco Saitta, directeur adjoint de l'Institut de minéralogie, de physique des matériaux et de cosmochimie à Sorbonne Université, qui collabore depuis plusieurs années avec Jean-Louis Hazemann. *« Il est important d'avancer étape par étape et de décomposer chaque partie du problème,* ajoute le physicien spécialisé dans la simulation de systèmes complexes. *Et pour ce qui nous concerne, de bien comprendre quels types de composés ont pu être synthétisés – ou non – par les sources hydrothermales, en reproduisant ce type de systèmes en laboratoire. »*

Dans les conditions des sources hydrothermales, l'eau change de structure

Cette démarche est d'autant plus essentielle que les connaissances et mesures in situ restent relativement limitées dans des milieux si hostiles. On y envoie certes des sous-marins, comme le *Nautile* de l'Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer (Ifremer) – *« une sorte de robot martien »*, plaisante François Guyot –, mais les gradients d'acidité (pH) ou de température restent, par exemple, très difficiles à déterminer. Il est en outre quasiment impossible, à partir de prélèvements in situ, de distinguer les composés organiques d'origine biotique et abiotique car *« les cycles de réaction entre ces composés et avec les flux d'eau de mer sont aussi complexes que nombreux »*, prévient François Guyot. Les simulations informatiques, cruciales pour expliquer les processus chimiques à l'échelle microscopique, trouvent, elles aussi, rapidement leurs limites. La complexité des calculs, qui reposent sur la théorie de la fonctionnelle de la densité (une méthode quantique très utilisée pour calculer la structure électronique), croît en effet avec la puissance cube du nombre de particules. *« Les simulations deviennent donc rapidement infaisables, même avec les supercalculateurs les plus puissants »*, reconnaît Marco Saitta. Sans compter qu'il faut aussi prendre en compte la nature et les hétérogénéités du solvant, c'est-à-dire du milieu dans lequel se déroulent les réactions chimiques. Or, dans les conditions des sources hydrothermales, l'eau change de structure et se comporte de manière très différente de celle qui coule en surface. Elle devient supercritique, avec des propriétés à mi-chemin de celles d'un liquide et d'un gaz. *« La densité et la viscosité deviennent notamment très faibles, faisant de cette substance un milieu très réactif »*, explique Marco Saitta.

C'est justement pour étudier expérimentalement ce type de fluides que Jean-Louis Hazemann a commencé à construire des autoclaves au début des années 2000. Il s'agissait alors de mieux comprendre plusieurs phénomènes : comment les métaux étaient transportés jusqu'aux dorsales océaniques pour y former des gisements ; comment les silicates y étaient eux-mêmes dégradés par l'eau de mer pour produire des monoxyde et dioxyde de carbone, ainsi que du dihydrogène ; comment la chitine – qui compose la carapace des crustacés hydrothermaux – conservait sa structure dans de telles conditions. *« Nous avons ainsi fabriqué une dizaine de générations d'autoclaves »*, note Jean-Louis Hazemann. Celui qui commencera à être exploité au printemps aura coûté près de 100 000 euros et existe en un unique exemplaire. Il a été testé début 2020 au synchrotron Soleil, un accélérateur de particules situé à Saclay,

PABLO CHIGNARD



L'ÉTAT DE L'EAU DANS L'AUTOCLAVE

Les expériences permettront l'analyse des réactions hydrothermales dans le régime supercritique (en rose), au-delà d'une pression de 221 bars et d'une température de l'eau de 374 °C. Les propriétés de ce fluide sont alors à mi-chemin entre celles d'un liquide et d'un gaz – notamment la densité, qui connaît des fluctuations locales importantes, avec des zones quasiment dépourvues de molécules d'eau (boules grises). La réactivité du solvant devient beaucoup plus importante et pourrait favoriser la synthèse de composés organiques. Les domaines proches des transitions de phase et de l'isochore critique (variation de la température et de la pression, mais à volume constant) seront examinés avec la plus grande attention.

en « observant » une réaction catalytique : l'hydrogénation du dioxyde de carbone en méthanol, à très hautes température et pression, en présence de cobalt et d'indium. *« L'évolution des produits et paramètres réactionnels a pu être très finement caractérisée »*, se félicite Jean-Louis Hazemann. Tel est bien l'apport majeur du nouvel instrument : examiner le déroulement de réactions chimiques en conditions extrêmes et quasiment en temps réel en modulant une large gamme de paramètres.

UN TOUR DE FORCE EXPÉRIMENTAL

Pour reproduire les processus hydrothermaux et réaliser ce tour de force expérimental, les réactifs (eau, dihydrogène, ammoniac, monoxyde et dioxyde de carbone, etc.) seront introduits dans la partie haute de l'autoclave, tandis que les produits seront drainés vers le bas jusqu'à un spectromètre de masse. Dans la partie centrale, le milieu réactionnel sera comprimé de 250 à 600 bars par un gaz d'hélium tout en étant chauffé entre 300 et 500 °C. Deux types de « fenêtres » permettront alors de l'ausculter. La première, en saphir, pourra être illuminée par des lasers. Et fournir ainsi des données spectroscopiques sur les intermédiaires réactionnels – les composés organiques transitoires permettant de reconstituer les mécanismes à l'œuvre. C'est à l'Institut Néel, avec des spectromètres Raman, que ces mesures seront prises. Fabriqué en béryllium, le second hublot sera traversé par un faisceau de rayons X très brillants. Produit par le nouveau synchrotron de l'ESRF, il permettra de caractériser la structure du solvant, dans les régimes supercritiques et au voisinage des transitions de phase en particulier. Et d'associer ainsi tel processus réactionnel aux fluctuations locales de la densité de l'eau.

« Nous espérons observer très vite la formation de composés organiques et par la suite d'acides aminés, comme dans les expériences de Miller », trépigne Jean-Louis Hazemann. Ce qui serait, effectivement, une première pour ce type de travaux. Ceux-ci devraient d'ailleurs susciter d'énormes progrès sur la chimie organique des systèmes hydrothermaux. Et fournir aussi aux théoriciens d'importants jeux de données pour alimenter et contraindre leurs modèles. *« Ces données quantitatives, qui font souvent défaut dans les recherches sur les origines de la vie, permettront d'éliminer certaines hypothèses et de faciliter les calculs »*, se réjouit Marco Saitta. Enfin, même si personne ne s'attend à voir surgir une cellule vivante ou un brin d'ADN de l'autoclave, des résultats étonnants ne sont pas à exclure : polymérisation d'acides aminés en peptides dans un régime semblable aux conditions naturelles ou synthèse préférentielle d'un sucre comme le ribose dans une phase supercritique… *« Nous ferions alors,* jubile François Guyot, *un pas de géant ! »* ■

Franck Daninos

BRUNO BOURGEOIS

Les recettes d'un métabolisme originel

À quoi ressemblaient les cycles biologiques primitifs ? En décortiquant deux voies métaboliques fondamentales qui produisent des molécules indispensables au développement de la vie, nous avons montré qu'il était possible de les réaliser avec des éléments simples comme du fer, dans des conditions qui pouvaient exister il y a 4 milliards d'années.

Joseph Moran
DIRECTEUR DU LABORATOIRE DE CATALYSE CHIMIQUE, INSTITUT DE SCIENCE ET D'INGÉNIERIE SUPRA-MOLÉCULAIRES (CNRS, UNIVERSITÉ DE STRASBOURG).

La vie est aujourd'hui omniprésente sur Terre. Pourtant, notre planète est restée inhabitée pendant au moins plusieurs centaines de millions d'années. Que s'est-il passé à l'échelle nanométrique pour que la matière, initialement inerte, finisse par former des réseaux complexes de molécules biologiques, marquant le début du règne de ce qu'on appelle la vie ? Cette question fascine notre équipe, qui l'aborde depuis 2013 sous l'angle du métabolisme.

Le métabolisme est l'ensemble des réactions chimiques qui se déroulent au sein d'un être vivant afin de le maintenir en vie et de lui permettre d'interagir avec son environnement. C'est le réseau de réactions le plus sophistiqué au monde. Toutefois, malgré sa complexité, la vie a une façon assez unique de construire et de décomposer la matière. Elle transforme des substances simples comme le dioxyde de carbone (CO_2), l'azote ou l'hydrogène en métabolites, des molécules impliquées dans le métabolisme. Ces métabolites s'assemblent ensuite, formant des molécules fonctionnelles (telles les protéines) ou porteuses de l'information génétique (comme l'acide désoxyribonucléique, l'ADN, et l'acide ribonucléique, l'ARN). Mais l'assemblage de ces molécules complexes ne se produit dans les cellules actuelles qu'avec la présence d'enzymes, c'est-à-dire de protéines qui catalysent (*) les nombreuses transformations élémentaires du métabolisme. Or ces enzymes ne peuvent être produites qu'à partir de l'information contenue dans les molécules génétiques (ADN, ARN), qui sont d'un niveau de complexité très élevé.

Pour résoudre ce paradoxe de l'œuf et de la poule, la plupart des scientifiques soutiennent l'idée que la vie aurait débuté avec la fabrication de molécules jouant à la fois le rôle de catalyseur et de support de l'information. Dans le vivant actuel, c'est l'ARN qui joue ce double rôle. Cette longue molécule est en effet l'intermédiaire entre l'information génétique stockée dans l'ADN et les protéines, mais elle a aussi un rôle d'enzyme. D'où l'hypothèse qu'il aurait existé, dans le monde ancien, une chimie de la vie essentiellement orchestrée par ce type de molécule : c'est l'hypothèse d'un monde ARN. Mais il existe une autre manière de résoudre ce paradoxe. Dans notre laboratoire, nous pensons ainsi que les premières formes de métabolisme n'étaient pas fondamentalement différentes de celles que nous connaissons aujourd'hui. En effet, l'évolution tend à modifier progressivement un système qui fonctionne déjà, et non à tout réinventer ! C'est pourquoi nous postulons que le métabolisme actuel a pu exister dans une version primitive, où des métaux et des minéraux naturels remplaceraient les enzymes dans leur rôle de catalyseur. Ainsi, de simples composés inorganiques disponibles dans l'environnement auraient permis des réactions organiques donnant naissance au métabolisme, avant l'apparition de molécules complexes comme l'ARN.

UNE CATALYSE SANS ENZYMES

Pour étayer cette dernière hypothèse, nous nous sommes d'abord intéressés aux voies métaboliques les plus fondamentales, à savoir celles qui convertissent le CO_2 en métabolites simples, afin de voir si celles-ci peuvent se produire avec de simples métaux. Parmi les six voies métaboliques différentes que la vie utilise aujourd'hui pour transformer le CO_2, deux ont été particulièrement étudiées par notre équipe : la voie de Wood-Ljungdahl et le cycle inverse de Krebs. La voie de Wood-Ljungdahl est un ensemble de réactions biochimiques utilisées par certaines bactéries et archées (lire p. 36). Elle permet à ces organismes de produire de l'acétate et du pyruvate à partir du

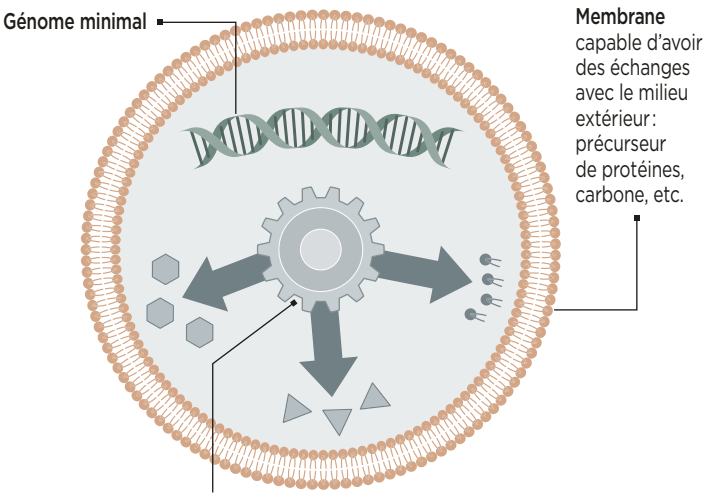
ESCANLAR

CO_2. Ces deux molécules composent la « matière première » biologique : par exemple, la synthèse de lipides se fait à partir d'acétate, et le pyruvate est le précurseur des sucres. En étudiant dans le détail cette voie, nous nous sommes rendu compte que les enzymes qui catalysent les réactions possèdent des métaux de transition comme le fer, le nickel ou le cobalt. Ces métaux auraient-ils pu réaliser la catalyse seuls, c'est-à-dire sans l'aide des enzymes ? Pour le savoir, nous avons cherché dans un premier temps des conditions expérimentales capables de reproduire la voie de Wood-Ljungdahl (1). Les tentatives furent nombreuses, car beaucoup de paramètres doivent être ajustés, comme la pression de CO_2, la température, ou encore la quantité et la nature des métaux à ajouter. Après plusieurs essais infructueux, nous avons obtenu une recette prometteuse : en présence de CO_2 (entre 1 et 40 bars), il suffit de faire chauffer (entre 30 et 100 °C) un mélange d'eau salée et de métaux sous leur forme native (au choix le fer, le nickel ou le cobalt). Dans ces conditions, nous observons l'apparition du formiate, du méthanol et de l'acétate, des métabolites de la voie de Wood-Ljungdahl. Plus intéressant encore, il se forme du pyruvate, un composé impliqué dans le cycle inverse de Krebs.

Bien qu'étonnants, ces résultats ont suscité des critiques de la part de la communauté scientifique. Les biologistes nous ont fait remarquer que les êtres vivants qui utilisent aujourd'hui la voie de Wood-Ljungdahl, comme les micro-organismes des sources hydrothermales, ne se servent pas du fer métallique, mais de l'hydrogène (H_2). En outre, les géologues nous ont expliqué que, même si le noyau de la Terre est constitué principalement de fer métallique, ce dernier n'est pas très abondant au niveau de la croûte terrestre, l'un des endroits où la vie aurait pu apparaître. Ces critiques étaient-elles justifiées ? En faisant équipe avec William Martin, de l'université Heinrich Heine, à Düsseldorf, et Harun Tüysüz, de l'Institut Max-Planck de Mülheim, en Allemagne, nous avons découvert que certains minéraux à base de fer (comme la magnétite, la greigite et l'awaruite), présents dans les sources hydrothermales, catalysent la réaction entre le CO_2 et le H_2, formant les mêmes molécules que celles de nos précédentes expériences : l'acétate et le pyruvate (2). Par conséquent, il est raisonnable de penser qu'une version sans enzymes de la voie de Wood-Ljungdahl ait pu exister sur la Terre primitive.

LES FONCTIONS D'UNE CELLULE MINIMALE

Grâce à des expériences de biologie de synthèse, les chercheurs essaient de reproduire les fonctions essentielles des cellules. Ils apportent un éclairage sur ce qui a pu se produire lors de l'émergence de la vie.



Le métabolisme comprend la machinerie de fabrication de molécules qui composent la cellule : des phospholipides pour la membrane, des enzymes pour la division cellulaire, des enzymes pour la réplication du génome.

Passons à l'étude de la deuxième voie métabolique : le cycle inverse de Krebs. Ce cycle est très important, car il comprend les cinq précurseurs universels de la biochimie : l'acétyl-CoA, le pyruvate, l'oxaloacétate, le cétoglutarate et le succinate. Toutes ces molécules sont essentielles à la formation des lipides, des sucres ou encore des acides aminés (les composants des protéines). De plus, il est autocatalytique, c'est-à-dire qu'il possède une propriété d'auto-amplification qui produit exponentiellement de la matière, une propriété intéressante dans le cadre de la chimie prébiotique où la concentration est un critère déterminant. Le cycle inverse de Krebs comporte une dizaine d'étapes. Parmi elles, cinq nécessitent de l'adénosine triphosphate (ATP), une molécule cruciale pour son rôle de monnaie d'échange de l'énergie au sein des cellules. Comme les premières formes de métabolisme n'utilisaient probablement pas une molécule aussi complexe, nous avons expérimenté les séquences dont les étapes sont indépendantes de l'ATP.

Comme pour la voie de Wood-Ljungdahl, nous avons testé différentes conditions expérimentales (3). Cinq des six réactions étudiées peuvent

(*) **Un catalyseur** est une entité chimique capable d'accélérer certaines transformations.

(*) **Le cycle du glyoxylate** est une voie métabolique dérivée du cycle de Krebs, et présente chez les plantes, les bactéries et certains champignons.

(*) **Un ribonucléotide** comprend une base nucléique (adénine, guanine, cytosine ou uracile), un ribose, et un ou plusieurs groupements phosphates. Il constitue l'ARN.

INFOGRAPHIE : BRUNO BOURGEOIS

avoir lieu en présence de fer, de zinc ou de chrome (métalliques ou ioniques) à 70 °C dans une eau légèrement acide. Seule la sixième, qui transforme de l'aconitate en citrate, requiert un chauffage à 140 °C et une eau très acide. Cependant, les cinq autres réactions fonctionnent également dans ces conditions proches de celles environnant les sources hydrothermales. Ainsi, avec quelques métaux, nous avons produit les six réactions indépendantes de l'ATP du cycle inverse de Krebs en n'utilisant aucune enzyme. Mais peut-on réaliser un cycle inverse de Krebs complet en se passant d'ATP ?

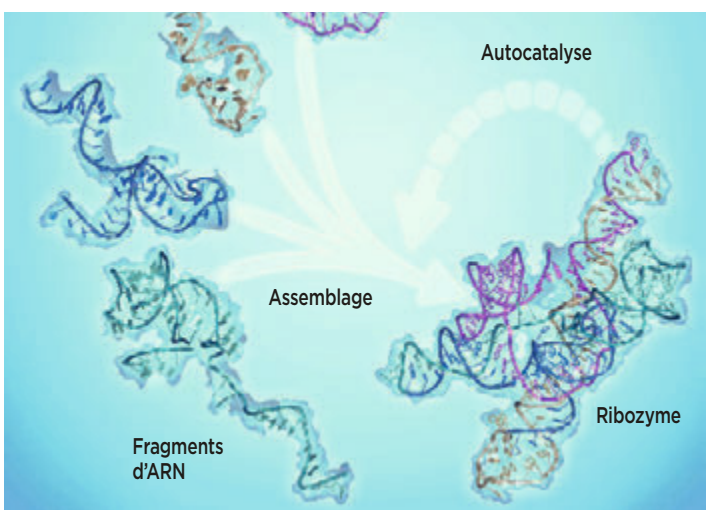
UN NOUVEAU RÉSEAU DE RÉACTIONS

Les travaux de l'équipe de Daniel Segrè, de l'université de Boston, nous ont permis d'avancer. Ces chimistes avaient montré que le pyruvate et une nouvelle molécule, le glyoxylate (*), pouvaient avoir une place centrale dans un métabolisme sans ATP (4). Nous les avons alors testés avec nos catalyseurs métalliques. Expérimentalement, lorsque le pyruvate et le glyoxylate sont mélangés avec du fer oxydé à 70 °C, de nombreux métabolites sont synthétisés suivant un nouveau réseau de réactions (5). Ce réseau comprend les cinq précurseurs universels et les mêmes types de réactions que l'on retrouve en biochimie. Aussi, en ajoutant de l'hydroxylamine et du fer métallique, quatre acides aminés sont produits. Enfin, ce réseau partage de nombreuses réactions et molécules impliquées dans le cycle de Krebs et le cycle du glyoxylate, qui sont des voies métaboliques utilisées par le vivant actuel. Ainsi, nous avons conclu que ce réseau, ou au moins certaines de ses parties, pourrait constituer une forme primitive des cycles biologiques connus aujourd'hui. Après avoir étudié les différentes voies de fixation du CO_2, nous essayons de reproduire les mécanismes de fabrication des sucres et même des ribonucléotides (*), la base de l'ARN. Il reste encore beaucoup à faire, mais plus nous cherchons, plus il nous semble probable que les premières formes de vie aient utilisé un réseau complexe de réactions ressemblant aux voies métaboliques que nous connaissons aujourd'hui. ■

(1) S. J. Varma *et al., Nat. Ecol. Evol., 2,* 1019, 2018.
(2) M. Preiner *et al., Nat. Ecol. Evol., 4,* 534, 2020.
(3) K. B. Muchowska *et al., Nat. Ecol. Evol, 1,* 1716, 2017.
(4) J. E. Goldford *et al., Cell, 168, 1126,* 2017.
(5) K. B. Muchowska *et al., Nature, 569,* 104, 2019.

Sur la piste de l'évolution moléculaire

Le vivant ne se résume pas à ses constituants ! Si synthétiser des précurseurs des briques élémentaires essentielles à la vie cellulaire est une approche très suivie par les chercheurs, des biochimistes tentent une autre voie : reproduire les fonctions qui le caractérisent, comme sa capacité à produire sa propre matière (autocatalyse), celle de se répliquer (autoréplication) et surtout celle d'évoluer. De nouvelles expériences prometteuses sont en cours.



▲ *Dans cette réaction d'autocatalyse, des fragments d'ARN s'assemblent en ribozymes (acide ribonucléique et enzymes) dérivés de la bactérie* Azoarcus.

PHILIPPE NGHE

Trop souvent, on résume le vivant à sa capacité de réplication : celle de « donner la vie », notamment par la reproduction. Mais la vie se définit aussi… par le changement ! En effet, la possibilité d'obtenir des innovations et de les maintenir au cours de la reproduction est une condition nécessaire à l'évolution darwinienne. Mais l'établissement d'un tel système chimique est un défi, que mon équipe et moi-même tentons de relever. Pour ce faire, nous explorons la piste de l'ARN, cette molécule porteuse de l'information

Philippe Nghe
MAÎTRE DE CONFÉRENCES, ÉCOLE SUPÉRIEURE DE PHYSIQUE ET DE CHIMIE INDUSTRIELLES DE LA VILLE DE PARIS ET UNIVERSITÉ PARIS, SCIENCES ET LETTRES
Spécialiste de biophysique, il tente de reproduire les réseaux d'interactions biochimiques des cellules.

génétique qui sert à la synthèse de protéines. Car elle est bien plus que cela : elle est un catalyseur, capable de réaliser des opérations de recombinaison moléculaire. Pour ce double rôle, on parle de « ribozymes » – mot-valise formé à partir d'« acide ribonucléique » et « enzyme ». Dans notre laboratoire, nous étudions comment cette recombinaison pourrait engendrer une grande diversité de nouvelles séquences d'ARN et les conditions pour que celles-ci favorisent leur propre reproduction.

Pour nos expériences, nous utilisons un modèle de ribozyme issu de la bactérie *Azoarcus*. Ces ribozymes sont des ARN composés d'un enchaînement de 200 molécules (nucléotides) de long. Ils peuvent être coupés en fragments. Une fois mis en présence d'un ribozyme complet dérivé d'*Azoarcus*, ces fragments s'assemblent en de nouvelles copies du ribozyme. L'une des difficultés est de mesurer ce qui se passe. Nous y sommes parvenus en couplant des outils dits de microfluidique de gouttelettes – qui permet de faire de chaque goutte un minuscule compartiment de réaction – à une technique de catalogage et d'identification moléculaire (le code-barres moléculaire). En séquençant ces codes-barres, nous identifions rapidement les ARN obtenus dans les gouttelettes, de sorte que nous sommes capables de suivre l'évolution de nos réseaux d'ARN dans le temps et dans ces différents compartiments.

Dans un premier temps, nous avons produit une banque de 20 000 gouttelettes de 5 picolitres (10^{-12} litre) contenant 24 combinaisons de fragments de ribozyme **(1)**. Puis, des ensembles aléatoires de 1 à 5 gouttelettes de cette banque initiale ont été fusionnés avec une gouttelette de 50 picolitres contenant d'autres fragments et sels nécessaires à la réaction. Après incubation à 48 °C pendant une heure, la composition de chaque gouttelette a été analysée. Nous avons ainsi obtenu des milliers de réseaux d'ARN qui catalysent leur propre formation à partir de fragments. Ainsi, non seulement ces réseaux se répliquent, mais ils montrent des différences prometteuses pour l'évolution. Celles-ci proviennent des relations entre la topologie du réseau de réactions et la composition chimique.

Cette expérience nous permet de déterminer des conditions d'évolution de ces réseaux. Nous avons ainsi constaté deux types de compromis : d'une part, entre la croissance (le nombre d'ARN obtenus dans une gouttelette) et la variation dans les réseaux de réactions ; d'autre part, entre cette variation et la robustesse aux changements environnementaux (modification du milieu de réaction). Ces observations nous semblent pertinentes pour les scénarios où l'évolution précoce dépend de l'hétérogénéité environnementale. En effet, dans certains scénarios prébiotiques, l'évolution dépend d'un équilibre entre la persistance des compositions chimiques – la robustesse aux changements environnementaux – et l'exploration de nouvelles compositions – la capacité à intégrer de nouvelles formes moléculaires. Dans ces conditions, l'apparition au hasard de nouveaux catalyseurs, en raison soit de réactions rares, soit d'intrants environnementaux, permettrait à son tour l'apparition de nouveaux réseaux autocatalytiques auto-entretenus.

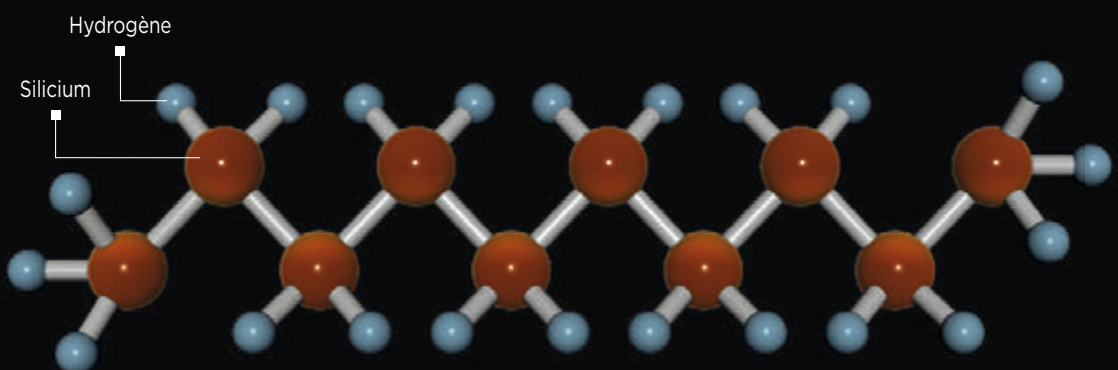
Une telle dynamique fournit donc une voie progressive par laquelle de nouveaux états chimiques peuvent être explorés et sélectionnés d'une manière darwinienne. Toutefois, nous devons encore développer notre système d'expérimentation, et nous devons pour cela trouver de nouveaux ribozymes modèles, ou bien en inventer par biologie de synthèse, de manière à obtenir plus de diversité dans les fragments issus des réactions chimiques complexes. En outre, il reste à comprendre comment l'évolution darwinienne dans les réseaux parvient à sélectionner des chimies de complexité croissante, ce que peuvent favoriser des cycles environnementaux de température, de salinité ou d'autres conditions physico-chimiques. ■

(1) S. Ameta *et al.*, bioRxiv, doi:10.1101/726497, 2020. (À paraître dans *Nature Communications*).

DR

DES BIOCHIMIES HYPOTHÉTIQUES

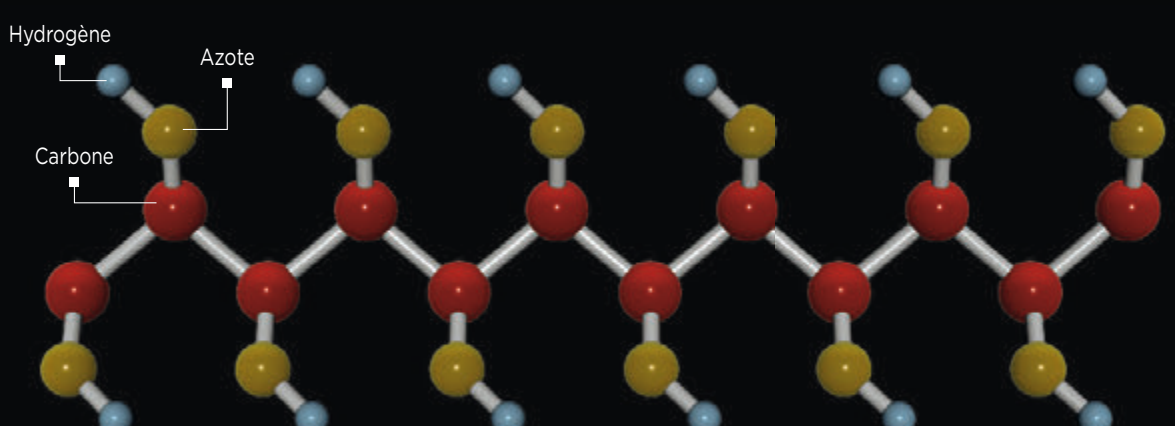
Tout le vivant que nous connaissons est caractérisé par la chimie du carbone. Un ensemble de réactions variées permet des assemblages de plus en plus complexes jusqu'aux cellules. Mais pourrait-on imaginer une autre biochimie, mettant en jeu des éléments différents, comme le silicium, le phosphore ou l'azote ? Et avec un solvant qui ne serait pas l'eau ? Voici quelques pistes ouvertes dans cette exploration d'un autre monde possible. ■ **Philippe Pajot**



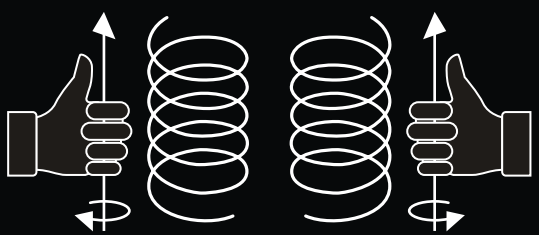
UN MONDE DE SILICIUM

Le silicium offre une ressemblance avec le carbone. En particulier sa tétravalence, qui permet de longues chaînes stables (ci-dessus). Toutefois, son affinité pour l'oxygène, voire pour le carbone, fait que toute structure moléculaire à base de silicium dans un monde qui contiendrait de l'eau ou du carbone ne serait pas stable (1) et se limiterait largement à des composés solides très difficiles à intégrer dans un métabolisme. Par ailleurs, des structures carbonées-azote (ci-dessous) seraient stables et susceptibles de capter l'énergie lumineuse et de la transférer (2).

(1) J. J. Petkowski *et al., Life, 10,* 84, 2020. **(2)** M. Rahm *et al., PNAS, 113,* 8121, 2016.



BRUNO BOURGEOIS - NASA/AMES/JPL-CALTECH



Hélice lévogyre (gauche)

Hélice dextrogyre (droite)

UN MONDE CHIRAL

Dans une biochimie différente, la chiralité pourrait être inverse de celle du vivant terrestre caractérisé par des acides aminés presque toujours de type L (gauches) et des sucres de type D (droits). Pourquoi ne pas imaginer des biomolécules inversées (acides aminés D et sucres L) ? Dans ce monde symétrique, l'enroulement des molécules en hélice, comme le double brin d'ADN, serait dans l'autre sens par rapport à celui que nous connaissons. Cette vie à l'envers se comporterait-elle comme la nôtre ?

AMMONIAC ET HYDROCARBURES

Et si l'eau n'était pas le seul solvant où peuvent se produire des réactions biochimiques ? L'ammoniac (NH_3) ou le fluorure d'hydrogène (HF) ont des propriétés intéressantes. Les chercheurs évoquent parfois des mondes à hydrocarbures liquides pouvant favoriser la synthèse des lipides, ou encore l'acide sulfurique (H_2SO_4) présent en abondance dans l'atmosphère de Vénus (photo) qui pourrait servir à synthétiser une autre forme de vie. Une chose est sûre : les réactions en milieu aqueux paraissent plus faciles à faire et sont également beaucoup plus diverses, en tout cas dans les conditions de pression et de température qui règnent sur Terre.

UNE AUTRE PHOTOSYNTHÈSE

Sur Terre, si les plantes apparaissent vertes, c'est parce qu'elles contiennent des pigments verts – la chlorophylle – qui absorbent préférentiellement le rouge et le bleu. Mais une autre photosynthèse est envisageable pour le passé ! Elle utilise le rétinal, une molécule qui absorbe préférentiellement le vert et le jaune du spectre solaire et réémet de la lumière rouge et bleue, d'où une couleur pourpre. La Terre primitive, tout comme des exoplanètes abritant des plantes adaptées à cette photosynthèse, apparaîtraient donc pourpres (3).

(3) S. DasSarma et E. W. Schwieterman, *Int. J. Astrobiol.*, doi:10.1017/S1473550418000423, 2018.

Ces chercheurs entrepreneurs étudient les confins du vivant

Si les jeunes entreprises n'ont pas vocation à faire de la recherche fondamentale sur l'apparition de la vie, il peut leur arriver de s'approcher du sujet. Par exemple en développant de nouveaux outils de modélisation qui peuvent faciliter l'exploration d'hypothèses sur l'évolution des premiers organismes. Ou plus simplement en s'intéressant à la formidable inventivité du vivant. Qu'il s'agisse d'y trouver une inspiration ou de participer à sa préservation.

BIOMATHEMATICA
RETOUR SUR LES PREMIERS MÉTABOLISMES

■ Créée en janvier 2018
■ Effectif: 4
■ Levée de fonds: 150 000 € en 2018

Biomathématicien et bio-informaticien, Ghjuvan Micaelu Grimaud explore le vivant avec les armes de la biologie des systèmes. Cette discipline vise à comprendre les interactions des composants d'un système vivant mais aussi celles d'un système vivant avec son environnement, et ce en enchaînant des cycles expérimentation-modélisation-simulation-théorie. *« Nous établissons des cartes décrivant à différentes échelles les interactions connues entre toutes sortes d'éléments (cellules, organites, gènes, nutriments…), qui jouent un rôle au sein de ces organismes et entre eux »*, note-t-il.
Avant d'en arriver là, Ghjuvan Micaelu Grimaud s'est intéressé aussi bien au phytoplancton qu'aux abeilles. Un parcours étonnant. Il commence par un master d'océanographie à l'université de la Méditerranée (Aix-Marseille-2), avant d'intégrer en 2012 le centre Inria de Villefranche-sur-Mer en tant qu'ingénieur puis doctorant. En 2016, il soutient une thèse de biomathématique et bio-informatique, encadré par des chercheurs de l'université Nice Sophia Antipolis (université de Côte d'Azur) et d'Inria, sur la modélisation de l'effet de la température sur le phytoplancton. Puis direction les États-Unis pour un postdoctorat de deux ans à l'université d'État du Michigan sous la direction des professeurs Elena Litchman et Christopher Klausmeier. Là-bas, il se focalise sur le microbiome des abeilles, au sein duquel cohabitent huit espèces de bactéries. Il étudie leur métabolisme et leurs interactions, selon différentes conditions expérimentales concernant leur nutrition, par exemple la disponibilité des sucres, leur état de santé et l'intervention de facteurs perturbateurs extérieurs tels des pesticides.
Avec eux, il s'intéresse aussi à l'exobiologie, tous trois ayant répondu à un appel à projets émanant de la Nasa. Leur proposition est retenue et, courant 2018, ils perçoivent un financement de 360 000 dollars (300 000 euros) pour leur projet. Il s'agit d'utiliser les modèles, les outils et les méthodes développés durant son postdoctorat pour l'étude de certaines étapes de l'apparition de la vie sur Terre. L'objectif est de modéliser le métabolisme d'organismes simples (eubactéries et archées), considérés comme proches des premières formes de vie sur Terre (lire p. 26), et d'essayer de remonter le temps, de déterminer quels mécanismes encore plus simples auraient pu les précéder. Même si c'est sans doute encore lointain, le but ultime de ce type de recherche est de dresser un jour le portrait-robot du fameux Luca (Last Universal Common Ancestor, soit le dernier ancêtre commun universel), dont descendent toutes les espèces.
« Pour remonter dans le temps, explique

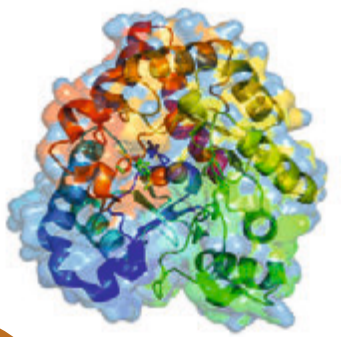
▲ *Les travaux du chercheur Ghjuvan Micaelu Grimaud sur l'exobiologie ont reçu un soutien financier de la Nasa.*

MEDIUM/DR

Ghjuvan Micaelu Grimaud, *nous utilisons deux techniques. La première consiste à inventer des états antérieurs, plus simples, et à regarder si une succession de mutations permet d'arriver à la situation observée chez un organisme existant. L'autre consiste à partir du présent et à le simplifier en supprimant une fonction pour voir si l'on obtient un schéma plus simple mais fonctionnel qui aurait pu le précéder. Toutes les hypothèses sont mises en compétition afin de repérer les plus probables.* »
« *Nous appliquons ces approches sur des espèces isolées mais aussi sur des communautés d'espèces en interaction, où certaines se nourrissent de ce que d'autres produisent,* poursuit le chercheur. *Un aspect intéressant de nos travaux concerne la dynamique des nutriments au sein d'une communauté bactérienne. Nous avons observé des phénomènes contre-intuitifs concernant le rôle du stockage chez certaines espèces. Nous avons déjà présenté des résultats préliminaires dans deux congrès, et nous nous préparons à publier un premier papier théorique. Nos résultats complets devraient être rendus publics en 2022 ou 2023.* »
Pendant ses recherches, le scientifique mûrit un projet d'entreprise. Revenu en France fin 2017, il lance sa start-up sur sa terre natale – il est né en Corse –, à Ajaccio. « *Notre objectif est d'appliquer les mathématiques à des systèmes biologiques complexes, surtout le microbiome humain. Nous maîtrisons une méthodologie et un outillage relevant de la biologie des systèmes pour caractériser, prédire, contrôler et optimiser des communautés microbiennes, simples ou complexes.* »
L'idée est d'appliquer cette expertise et ces outils à des problèmes concrets, pour le compte d'entreprises. « *Les clients que nous visons travaillent notamment sur des problèmes de contrôle qualité dans l'alimentaire, sur des produits probiotiques ou thérapeutiques, et cela dans le cadre de l'alimentation humaine ou animale.* » ■ **Pierre Vandeginste**
■ www.biomathematica.com

GENE&GREEN TK

GENE & GREEN TK
UNE ENZYME AUX PROPRIÉTÉS DÉCONTAMINANTES ET ANTIBIOTIQUES



▲ *L'enzyme SsoPox, utilisée par la technologie VesuBACT pour lutter contre certaines bactéries.*

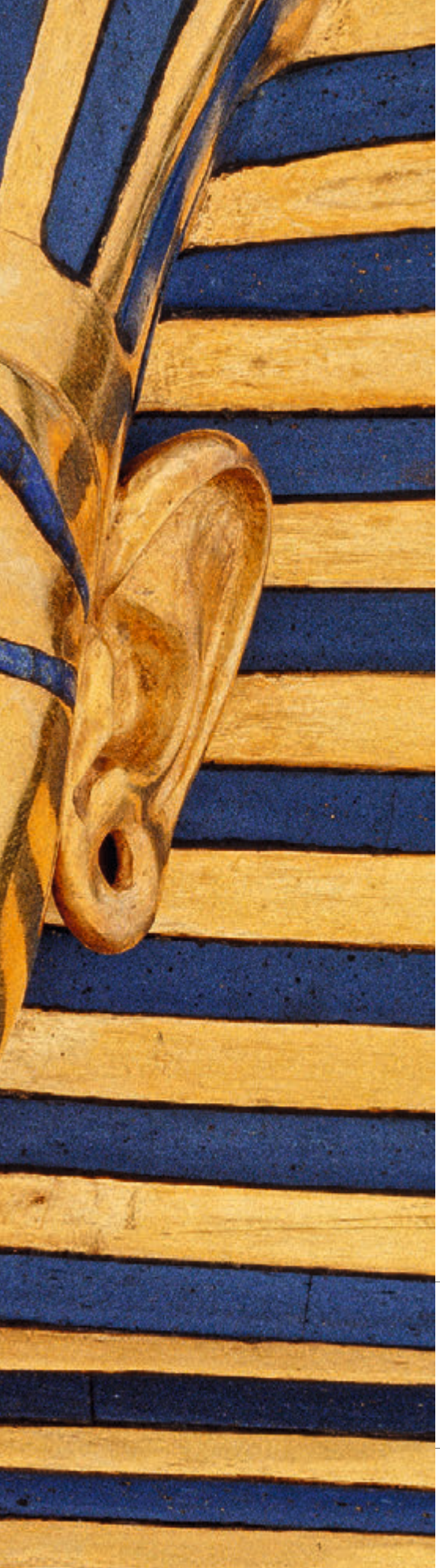
■ Créée en juin 2013
■ Effectif: 7
■ Levée de fonds: envisagée

Saccharicus solfataricus **est une archée extrêmophile, notamment hyperthermophile, découverte en 1980 dans la Solfatare, un volcan voisin du Vésuve. Elle produit l'enzyme SsoPox (*Saccharicus solfataricus* paraoxonase), capable, entre autres, de casser les composés organophosphorés. En particulier des neurotoxiques comme le sarin ou le VX et des pesticides tels que malathion, diazinon, chlorpyrifos… SsoPox n'a pas peur de la chaleur: sa demi-vie à 100 °C est de 90 min. Pratique, pour une production industrielle. Il y a quinze ans déjà, le biologiste Éric Chabrière étudiait le SsoPox à Aix-Marseille Université. Encouragé par la direction générale de l'armement, il a conçu un agent de décontamination pour lutter contre une attaque à l'arme chimique organophosphorée: le VesuTOX, en cours d'évaluation. Puis il a cofondé, à Marseille en 2013, Gene&GreenTK. David Daudé en est aujourd'hui le président et directeur scientifique: « *Nous avons beaucoup amélioré la molécule d'origine, par génie génétique. Nous avons multiplié son efficacité de plus de trois ordres de grandeur. Et nous savons la produire en fermenteur.* » *Sso*Pox a une seconde corde à son arc. « *Elle s'attaque aux lactones, ces molécules qui permettent aux bactéries Gram - de communiquer et de se compter avant de passer à l'attaque.* » La start-up a ainsi mis au point VesuBACT, une alternative aux antibiotiques dans un certain nombre d'infections. Reste à passer à la commercialisation. ■ P.V.**
■ www.gene-greentk.com

En bref

Une caméra qui voit comme un œil ? Oui, grâce à ce capteur bio-inspiré développé par la start-up parisienne Prophesee. Au lieu de fournir un flot continu d'images en grande partie identiques, comme les capteurs classiques, il ne génère de l'information que lorsqu'un de ses pixels décèle un changement de luminance, comme le fait notre rétine. Ainsi, le volume de données est en pratique réduit d'un facteur dix à mille, selon l'application. Et le mouvement est détecté avec une résolution temporelle qui équivaut à celle d'un capteur opérant à 10 000 images par seconde. La première caméra industrielle exploitant ce capteur a été lancée en novembre dernier, au Japon, par CenturyArks.
■ www.prophesee.ai

L'IA surveille la biodiversité. La start-up rennaise Wipsea recense automatiquement les populations d'espèces menacées: dugong (cousin du lamantin), diable de mer (raie qui vit en Méditerranée)… Et ce grâce à des drones, des caméras et des algorithmes de vision artificielle reposant sur l'apprentissage profond.
■ www.wipsea.com



AROLDO DE LUCA

D'où viennent les inégalités ?

C'est au cours du Néolithique, apparu il y a 12 000 ans, qu'émergent les inégalités sociales. Avec l'invention de l'agriculture sédentaire, la population humaine se met à croître de façon continue. Des communautés de plus en plus nombreuses ont les moyens de consacrer du temps à des tâches non directement productives telles que la construction de monuments mégalithiques, la première métallurgie de l'or et du cuivre, mais aussi la production de surplus. Surplus que des personnes plus charismatiques que d'autres, avec de meilleurs talents (d'organisateur, de guerrier, de chaman…), réussissent à capter pour elles-mêmes. Cette forme émergente de pouvoir constitue l'étape précédant l'apparition des premières villes et des premiers États. Également instrument de domination des femmes par les hommes, ces inégalités sont-elles pour autant irréversibles ? Pour Jean-Paul Demoule, il est encore des raisons d'espérer.

◀ *Entre l'homme et les dieux, le pharaon, qui pouvait maîtriser les eaux du Nil et donc assurer la fertilité des plaines (ici Toutankhamon, représenté sur son masque funéraire).*

DR

Jean-Paul Demoule
PROFESSEUR ÉMÉRITE DE PROTOHISTOIRE EUROPÉENNE À L'UNIVERSITÉ PARIS-1 (PANTHÉON-SORBONNE)
Membre honoraire de l'Institut universitaire de France, il a été président de l'Inrap de 2002 à 2008.

Le débat sur l'origine des inégalités agite l'Occident depuis au moins cinq cents ans. Malgré Étienne de La Boétie au XVIe siècle et son *Discours de la servitude volontaire*, puis Thomas Hobbes au XVIIe siècle et son *Léviathan*, et enfin Jean-Jacques Rousseau et son *Discours sur l'origine et les fondements de l'inégalité parmi les hommes* (1754), il n'a pas été tranché de façon définitive. Il y a d'un côté les tenants du caractère naturel de l'inégalité, lié donc à la nature humaine, et de l'autre ceux qui y voient de pures constructions politiques, donc réversibles.

À propos de nature, l'observation des sociétés animales a été et continue d'être un lieu d'argumentation. Ne parle-t-on pas de « mâles dominants » ou « alpha » dans les sociétés de singes, de loups ou de rats ? En réalité, tant que les éthologues ont été des chercheurs masculins, la chose paraissait claire. Mais quand des chercheuses s'en sont mêlées, le tableau s'est quelque peu brouillé. La bio-anthropologue américaine Shirley Strum, par exemple, a montré dans la seconde moitié du XXe siècle que les sociétés de babouins étaient au moins autant structurées par les alliances entre femelles que par les compétitions entre mâles (1). Des analyses génétiques ont prouvé que les jeunes singes ne descendent pas majoritairement des « mâles dominants », mais que les femelles ont visiblement une large palette de choix. Enfin, le primatologue néerlandais Frans de Waal a mis en valeur, dès les années 1980, l'importance des pratiques de réconciliation chez les primates, au moins aussi décisives que celles de compétition (2). Dans tous les cas, si nous avons bien des ancêtres communs, remontant à une dizaine de millions d'années, avec les autres primates, et si l'on peut déjà commencer à parler de « culture » et d'« apprentissage » pour certains d'entre eux, le réductionnisme biologique qui consiste à s'appuyer sur les sociétés animales pour parler des sociétés humaines est un peu limité.

Par ailleurs, nous ne savons rien de l'organisation des sociétés préhistoriques anciennes, depuis les premières formes humaines, il y a 6 ou 7 millions d'années, jusqu'à l'orée d'*Homo sapiens*, il y a 300 000 ans. Et nous ne commençons vraiment à pouvoir parler de ce dernier qu'à partir de 40 000 ans, quand il pénètre en Europe, là où les fouilles archéologiques ont été suffisamment denses pour que nos informations soient un peu plus consistantes. Que nous enseignent ces fouilles ? Que ces sociétés, dites du « paléolithique supérieur », entre 40 000 et 10 000 ans avant notre ère, étaient composées de petits groupes de quelques dizaines de personnes, nomadisant au gré des ressources saisonnières, dans le climat difficile de la dernière période glaciaire commencée il y a 115 000 ans. Dans ces sociétés, il n'y a pas, sauf à de très rares et discutables exceptions près (la tombe de Sungir en Russie, datée d'il y a environ 30 000 ans, où l'on a retrouvé les restes d'un homme avec plusieurs milliers de perles en ivoire de mammouth), de signes de différences sociales fortes.

Il en va de même chez la plupart des sociétés de chasseurs-cueilleurs qui ont pu être observées par les ethnologues. Les seules qui ont montré des signes d'inégalité sont celles qui, liées en général à des ressources aquatiques (poissons, coquillages, mammifères marins) et maîtrisant les techniques de stockage, ont eu la possibilité, au bord de mers ou de fleuves, de s'établir de façon sédentaire. C'est le cas par exemple des Amérindiens de la côte nord-ouest du Pacifique nord-américain (Haïdas, Tlingits) ou des sociétés préhistoriques Jômon du Japon. Encore pratiquent-elles souvent une petite horticulture d'appoint.

Tout change avec le Néolithique, c'est-à-dire lors de l'invention et de la généralisation de l'agriculture sédentaire, à partir d'il y a 10 000 ans avant notre ère. Elle apparaît dans plusieurs régions du monde, au moment où, parvenu à un certain degré de complexité psychique (dont témoigne l'apparition de la figuration il y a 40 000 ans et des innovations comme l'arc ou l'aiguille à chas), *Homo sapiens* se retrouve pour la première fois, au terme des 100 000 années de la dernière glaciation, dans l'environnement plus favorable de l'actuelle période interglaciaire. Si plantes et animaux domestiqués varient d'un continent à l'autre, la conséquence première de ce changement économique radical sera, avec une nourriture plus sécurisée, une augmentation continue de la démographie, la population humaine passant en 10 000 ans de 1 à 2 millions d'individus aux 7 milliards actuels. Et cela malgré une nourriture moins adaptée à notre physiologie, des tâches plus lourdes et répétitives, un temps de travail allongé et une généralisation des maladies et épidémies favorisées par la promiscuité avec les animaux.

▲ *Avec l'accroissement des populations, l'homme peut se consacrer à des tâches « non essentielles », comme la production de métaux précieux (ici, l'aigle Imdugud, en or, cuivre, bitume et lapis-lazuli, trésor d'Ur, à Mari, actuelle Syrie, environ 2500 avant J.-C.).*

PHILIPPE MAILLARD / AKG-IMAGES

DU TEMPS ET DE L'ÉNERGIE EN SURPLUS

Cet accroissement démographique aura lui-même trois conséquences principales. La première est une course permanente au progrès technique pour nourrir une population en constante croissance dans un monde fini : invention de la traction animale, de la charrue primitive, de la roue, puis de la métallurgie du bronze et du fer, des assolements et des engrais, et jusqu'à la mécanisation. La deuxième conséquence est l'accroissement des tensions entre des communautés désormais fixées sur des territoires précis. Si la violence interhumaine était ponctuellement attestée auparavant, elle se généralise : les villages se fortifient, des armes spécifiques sont créées, d'abord en pierre puis en bronze et en fer, offensives comme défensives, que suivront plus tard les armes à feu, jusqu'aux bombes et aux missiles contemporains. On sculpte en Europe, à partir du IVe millénaire, des stèles représentant des guerriers en armes, un thème jusque-là inconnu. Enfin, la troisième conséquence est justement le développement continu d'inégalités sociales visibles. Ainsi, les colons néolithiques originaires du Proche-Orient, qui répandent peu à peu l'agriculture sédentaire dans toute l'Europe à partir de 6500 ans avant notre ère, atteignent deux mille ans plus tard l'Atlantique, jusque-là infranchissable. Et c'est à ce moment précis que des personnes visiblement plus importantes que les autres sont enterrées le long de ses rivages, dans des caveaux funéraires faits d'énormes blocs de pierre, les dolmens, recouverts d'imposants tertres de terre. Les défunts emportent avec eux des objets de prestige, haches polies en jadéite d'une extraordinaire finesse venue des Alpes ou des perles vertes en variscite importées de la péninsule Ibérique. À l'autre bout du continent, le long de la mer Noire, là où le peuplement est le plus ancien et donc le plus dense, des tombes, comme à Varna (Bulgarie), contiennent jusqu'à 1 kg de parures en or sur un même individu (masculin). Que s'est-il passé ? D'une part, ces communautés de plus en plus peuplées ont eu les moyens de consacrer du temps et de l'énergie à des tâches non directement productives, comme la construction de monuments mégalithiques ou la première métallurgie de l'or et du cuivre, mais également la production de ce que l'on appelle le surplus, par exemple de céréales, de haches polies ou encore de sel. D'autre part, des personnes ont réussi à capter ce surplus pour elles-mêmes. Dans tout groupe humain, il existe des personnes plus charismatiques que d'autres, avec de meilleurs talents d'organisateur, de chasseur, de guerrier ou de

▲ *Dans la nécropole de Varna (Bulgarie) ont été mis au jour les plus anciens objets en or jamais découverts à ce jour (vers 4600 à 4200 av. J.-C.).*

chaman, voire de danseur ou de musicien, même dans des sociétés très simples, comme celle des Nambikwaras, décrite par Claude Lévi-Strauss au milieu du XXe siècle. Mais ceux-ci possèdent autant de devoirs que de droits, et toutes sortes de mécanismes limitent leur pouvoir (3). Ces « chefs » amazoniens doivent en effet justifier leurs faibles pouvoirs et, s'ils sont de grands guerriers, repartir éternellement au combat, avec les risques croissants dus à l'âge. Ils doivent redistribuer leurs maigres biens pour sécuriser leur « clientèle », ce qui limite l'accroissement de leurs richesses. Et s'ils meurent, ils sont enterrés avec elles, ce qui indique leur statut et fait la joie des archéologues, mais est aussi une façon pour la société de mettre ces richesses hors circuit.

Pour qu'un pouvoir (faiblement) politique, assorti d'un pouvoir (faiblement) économique, s'implante néanmoins de manière durable, il faut donc que ces mécanismes de contrôle « déraillent » à un moment. Pour quelles raisons ? Nous ne pouvons avoir à ce stade que des hypothèses. Mais il en est au moins des indices. Nous savons par l'histoire et par l'ethnologie que le pouvoir se donne toujours comme en relation avec le surnaturel. Ainsi, les rois européens étaient ou sont encore « sacrés » dans tous les sens du terme ; les pharaons, « serviteurs des dieux », maîtrisaient les eaux du Nil et étaient garants de la fertilité des terres ; dans le corps des chefs polynésiens coulait la force vitale du *mana ;* les empereurs de Chine étaient « Fils du Ciel » et ceux du Japon descendent en droite ligne d'Amaterasu, la déesse du Soleil ; même de nos jours, nombre de chefs d'État prêtent serment sur un livre sacré au moment de leur prise de fonction.

▲ *Plaque en or d'un harnais de cheval (trésor de Cucuteni, Roumanie, Ve siècle av. J.-C.).*

À TOMBEAUX OUVERTS

C'est pourquoi il n'est pas indifférent que les vestiges archéologiques témoignant de la puissance des premiers chefs semblent associés avec le surnaturel, en particulier dans les pratiques funéraires, par définition liées à une certaine maîtrise de l'au-delà. De fait, les monuments mégalithiques sont aussi des lieux cultuels, comme en témoignent les offrandes que l'on continue à y déposer après leur érection. Dans la nécropole de Varna apparaissent des rituels particuliers, avec des tombes sans corps, à l'exception d'un visage modelé en argile crue, mais contenant des objets précieux. On peut donc supposer que ces premiers dominants sont ceux qui ont su, sans doute en toute bonne foi, manipuler leurs semblables au nom de dons particuliers susceptibles d'attirer sur la communauté les bienfaits de puissances surnaturelles. Tels seraient les différents facteurs qui expliqueraient qu'ils aient fini par prendre l'ascendant sur leurs semblables.

Une fois constituées ces sociétés villageoises inégalitaires, que les ethnologues qualifient de « chefferies », l'étape suivante fut l'apparition des premières villes et des premiers États, à partir de 3500 ans environ avant notre ère en Mésopotamie et en Égypte, à peine plus tard en Iran et dans la vallée de l'Indus, en Chine au IIe millénaire, puis dans les Amériques. Ce type d'organisation, qui n'incluait encore que le tiers de l'humanité il y a quatre siècles, en concerne désormais plus de la moitié. La ville accompagne en général l'État, même s'il y eut au début beaucoup de simples cités-États (comme l'est encore Singapour), et s'il a pu exister quelques États peu ou non urbains. L'État, avec toute son organisation qui suppose bureaucratie, armée, police, clergé et écriture, institue une forme supplémentaire de domination et d'inégalité de répartition des biens. Il repose sur l'impôt, lequel, comme l'a argumenté récemment l'anthropologue américain James C. Scott, de l'université Yale (États-Unis), s'est la plupart du temps développé là où des sociétés cultivaient des céréales (blé, orge, maïs, millet, riz, sorgho). Ces plantes mûrissant toutes en même temps, cela les rendait faciles à décompter, à stocker et donc à prélever – à la différence d'autres, comme le manioc, l'igname, le taro, l'arbre à pain ou la patate douce (4).

Ce cheminement est souvent résumé par les anthropologues évolutionnistes selon un schéma en quatre formes sociales successives, respectivement les « bandes » (de chasseurs-cueilleurs), les « tribus » (d'agriculteurs plus ou moins égalitaires), les « chefferies » et finalement les « États ». Mais tout cela était-il irréversible, dans un imparable enchaînement mécanique ?

C'est ce contre quoi se sont élevés, à la suite de Pierre Clastres (5), un certain nombre d'ethnologues mais aussi d'archéologues, que l'on regroupe dans un courant dit de « l'anthropologie anarchiste » – au sens où ces chercheurs s'intéressent aux formes de résistance au pouvoir (*arkhê* en grec ancien). Ces formes de résistance, outre celles déjà mentionnées pour des sociétés simples, sont de

COLLECTION DAGLI ORTI/AURIMAGES

Extrait de *Une histoire des inégalités. De l'âge de pierre au XXIe siècle*

Dans cet essai, Walter Scheidel montre que seul un déchaînement de violence de masse, avec une mortalité démesurée, peut mettre fin à une période d'inégalités extrêmes.

Durant des milliers d'années, la civilisation n'a pas tendu vers la réduction des inégalités. Dans un large éventail de sociétés et à différents niveaux de développement, la stabilité a toujours favorisé les inégalités économiques. Cela se vérifie aussi bien dans l'Égypte des pharaons que dans l'Angleterre victorienne, dans l'Empire romain qu'aux États-Unis d'Amérique. Les chocs violents étaient indispensables pour perturber l'ordre établi, rendre plus égalitaire la répartition des revenus et des patrimoines, réduire l'écart entre les pauvres et les riches. [...] Quatre types de rupture brutale ont affaibli les inégalités : la guerre de masse, la révolution dite "transformatrice", la faillite de l'État et la grande pandémie. Nous les appellerons ici "les Quatre Cavaliers du nivellement". [...] Surgissant seuls ou en groupe, ils ont souvent eu, pour leurs contemporains, des conséquences aux allures d'apocalypse. Des centaines de millions d'hommes ont péri sur leur passage. Et toujours après le tumulte, quand la poussière soulevée retombait, l'écart de fortune entre les nantis et les démunis avait diminué, parfois prodigieusement. [...] S'il existe d'autres

facteurs de nivellement, leur bilan est mitigé : de l'Antiquité à nos jours, les seules réformes agraires ayant significativement réduit les inégalités étaient accompagnées de violence ou de menace de violence ; les crises macroéconomiques n'ont eu que des effets de courte durée sur la répartition des revenus et des patrimoines ; la démocratie n'est jamais parvenue d'elle-même à atténuer les inégalités ; bien que l'interaction entre l'éducation et les transformations technologiques conditionne indubitablement la dispersion des revenus, le rendement de l'éducation et celui des compétences se sont aussi révélés très dépendants des chocs brutaux ; enfin, il n'y a pas de preuves empiriques convaincantes permettant de soutenir l'idée que le développement économique moderne, en tant que tel, réduise les inégalités. À ce jour, aucune réduction non violente des inégalités n'a pu un tant soit peu égaler les résultats obtenus par les Quatre Cavaliers. [...] Même dans les économies avancées les plus progressistes, la redistribution et l'éducation sont devenues incapables d'amortir totalement la pression des inégalités croissantes de revenus avant impôts et transferts. Il pourrait y avoir des solutions dans les pays en développement, mais les contraintes budgétaires y demeurent fortes. Il ne semble donc pas facile d'accéder à une plus grande égalité par la démocratie, la régulation ou l'éducation. Rien de bien surprenant au regard de l'Histoire mondiale. À notre connaissance, les sociétés qui n'ont jamais été confrontées à des événements violents de grande ampleur – ainsi qu'à leurs tragiques conséquences – n'ont presque jamais connu de réductions majeures d'inégalités. Qu'en sera-t-il demain ? [...]"

Walter Scheidel, *Actes Sud, parution le 27 janvier 2021, 764 p., 28 €.*

KEEBLE & SHUCHAT PHOTOGRAPHY

Walter Scheidel
HISTORIEN
Les recherches de ce professeur d'études classiques et d'histoire à l'université Stanford, aux États-Unis, vont de l'histoire sociale et économique ancienne et de la démographie historique prémoderne à l'histoire mondiale comparative et transdisciplinaire de l'inégalité, de la formation de l'État et du bien-être humain.

▲ *Placés dans les tombes des dignitaires de haut rang, ces objets de jade sculptés (congs) permettaient de communiquer avec les forces supérieures et de conjurer les puissances maléfiques (culture de Liangzhu, vers 2500 av. J.-C.).*

▲ *Haches polies en jadéite venue des Alpes, découvertes sur la plage de Saint-Pierre-Quiberon (Morbihan) en 2007 et provenant sans doute d'un riche caveau (vers 6500 av. J.-C.)*

plusieurs sortes. James C. Scott a par exemple montré que, dans les régions montagneuses qui s'étendent du sud de la Chine jusqu'au nord-est de l'Inde et que des géographes ont appelées *« zomia »,* des populations très diverses se sont tenues pendant des siècles en marge des États centralisés dont ils dépendaient. Un constat analogue a été fait par l'Espagnol Alfredo González-Ruibal à propos des ethnies des plateaux limitrophes de l'Éthiopie et du Soudan (6).

Une autre forme a été relevée par David Graeber et David Wengrow, reprenant des intuitions anciennes de l'anthropologue Marcel Mauss, avec cette fois des alternances saisonnières. Chez les Amérindiens des Grandes Plaines nord-américaines ou chez les Inuits du Grand Nord, l'organisation sociale, très hiérarchisée et contraignante au moment des grandes chasses, faisait place, le reste du temps, à un relâchement librement « anarchique » de la société (7).

EFFONDREMENT DES (TROP) GRANDES CIVILISATIONS

Ces mêmes chercheurs ont proposé de détecter par l'archéologie, à date ancienne, des sociétés importantes en nombre mais où la hiérarchie sociale aurait été faible. Ils ne perçoivent par exemple aucune hiérarchie sociale forte dans l'organisation des cités de la civilisation de l'Indus au IIIe millénaire avant notre ère, ni dans les grandes agglomérations – plus de dix mille personnes – des villages de la culture de Cucuteni de Moldavie et d'Ukraine au Ve millénaire avant notre ère, ni même à certaines périodes de la vaste cité de Teotihuacan au début de notre ère, celle qui a précédé l'actuelle Mexico.

À une quatrième forme de résistance, documentée par l'histoire comme par l'archéologie, appartiennent les moments de contestation radicale du pouvoir établi, ce que nous appelons une « révolution ». De tels moments peuvent être repérés dès le Néolithique en diverses régions du monde. Au Proche-Orient, des agglomérations qui pouvaient atteindre plusieurs milliers de personnes, comme Abu Hureyra ou Tell Halula en Syrie, disparaissent au VIIe millénaire avant notre ère, au profit de villages modestes. Sur la côte atlantique, en Europe, les imposants monuments mégalithiques du Ve millénaire avant notre ère, réservés à quelques-uns et dont la Table des marchands à Locmariaquer est l'un des plus célèbres, font place au millénaire suivant à des tombeaux collectifs, sans aucun apparat ni offrande. Il peut s'agir de longues chambres funéraires rectangulaires, appelées « allés couvertes », abondantes dans toute l'Europe occidentale, dont certaines ont été mises au jour récemment à La Chaussée-Tirancourt (Somme) ou à Bazoches-sur-Vesles (Aisne). Cela peut être également des hypogées creusés dans le calcaire, abondants dans le département de la Marne, ou qui combinent tranchée et recouvrement par des dalles, comme celles de la montagne de Cordes près d'Arles. En Chine, la culture de Liangzhu, avec ses massives terrasses cérémonielles et ses tombes princières remplies d'objets de prestige en jade, se dissout vers la fin du IIIe millénaire avant notre ère.

On pense aussi aux « effondrements » (*collapses* en anglais) de civilisations, popularisés par l'Américain Jared Diamond et mis au compte, pour l'essentiel, de crises environnementales (8). On peut en effet inclure, dans les causes multiples qui les ont provoqués, des phénomènes de résistances politique et sociale face à des pouvoirs trop oppressifs. De fait, après ces « effondrements », ce ne sont pas des paysages désolés et des régions ravagées que l'archéologie découvre, mais le retour à des économies villageoises « en circuit court », mieux à même d'exploiter simplement les ressources. Ainsi de la disparition de la civilisation de l'Indus au IIIe millénaire, des cités et palais minoens et mycéniens vers - 1200, des « résidences princières » celtiques vers - 500, des cités mayas au début du Ier millénaire de notre ère ou, à peine plus tard, de ces cités dites « mississippiennes » de la vallée moyenne de ce fleuve.

La question des inégalités pose en définitive aux sciences sociales deux questions de fond, sinon deux énigmes : l'attitude des dominés et, symétriquement, celle des dominants. La première, exprimée il y a un demi-millénaire par Étienne de La Boétie, évoquée en introduction, est celle de la servitude volontaire. Pourquoi, nous qui sommes majoritaires, nous laissons-nous asservir par le « tyran », comme l'appelle La Boétie ? Il y trouve trois explications. La première est l'habitude, qui ne nous laisse rien entrevoir d'autre – *« There is no alternative* (il n'y a pas d'alternative) », disait la Première ministre britannique Margaret Thatcher dans les années 1980. De fait, nous sommes habitués à obéir, d'abord à nos parents, puis à nos enseignants, parfois aux officiers ou aux prêtres, puis à nos patrons, et donc à

INRAP, DIST. RMN-GRAND PALAIS / H. PAITIER – RMN - GRAND PALAIS - T. OLLIVIER

nos dirigeants. La deuxième est l'organisation déjà pyramidale de la société, où le « tyran » a ses affidés, qui ont eux-mêmes leurs subalternes, et ainsi de suite. La Boétie pensait sans doute à la féodalité, mais les régimes totalitaires sont ainsi structurés. Enfin, la troisième explication est religieuse, car *« le tyran abuse de la religion pour mal faire »*. Ce qui ne signifie pas que l'auteur était athée, chose impensable à son époque, mais nous ramène aux considérations sur les liens entre pouvoir et surnaturel.

La servitude volontaire a cependant ses limites, comme l'ont montré les « effondrements » et les révolutions relatées au fil de l'histoire, quand il existe des textes. Il est peu de régimes oppressifs qui se soient maintenus sur une longue durée sans tomber ou au moins devoir se réformer fortement.

L'autre point de vue est celui des dominants, et l'on peut y distinguer deux aspects : sa justification idéologique ; et ses motivations profondes, sinon psychiques. Pour remonter au philosophe britannique du XVIIe siècle Thomas Hobbes, l'être humain serait mauvais par définition, et son état de nature serait celui de *« bellum omnium contra omnes »* (la guerre de tous contre tous). Il faut donc un souverain éclairé pour régir et réglementer la société. Sa vision annonce celle du libéralisme économique que l'Écossais Adam Smith développera au siècle suivant. La société n'est composée que d'individus isolés – *« There's no such thing as society* (la société n'existe pas) », affirmait encore Margaret Thatcher – et en situation de compétition.

Économiquement, dans le cadre du marché, les bons producteurs ne pourront que se développer au détriment des mauvais, car les consommateurs délaisseront en principe les seconds au profit des premiers. Certains chercheurs ont donc argumenté que la hiérarchie sociale est apparue afin d'assurer, sinon l'ordre, du moins une bonne redistribution des productions dans une population devenue trop nombreuse (9). Le problème est que, tel que l'archéologie peut l'observer, cette redistribution, au moins si l'on en juge par les tombes mais aussi par les habitations, est tout sauf équitable – pour ne rien dire de notre « ruissellement » actuel.

Le second aspect de la domination est la volonté même de domination, sinon celle de puissance, pour reprendre un terme du philosophe allemand Friedrich Nietzsche. Il n'est sans doute pas très pertinent de convoquer nos cousins primates, et le réductionnisme biologique de la sociobiologie a fait long feu car si nous sommes banalement une espèce biologique parmi d'autres, les facteurs culturels l'emportent largement dans nos comportements. Or, la domination la plus originelle est celle des hommes sur les femmes, attestée sous des formes plus ou moins violentes dans toutes les sociétés. On ne connaît aucune société matriarcale, au sens où les femmes auraient un pouvoir politique exclusif. En revanche, l'idée d'un matriarcat primitif se retrouve dans diverses théories, et surtout dans des mythologies qui invoquent le renversement ancien d'un pouvoir féminin mal utilisé. Cette idée relève donc bien plus de la justification

Il y a des sociétés où les femmes sont moins opprimées que dans d'autres

de la domination masculine que d'une quelconque réalité (pré)historique. Les récits les plus anciens, de la guerre de Troie à l'enlèvement des Sabines, sont remplis de violences faites aux femmes, et dans la plupart des sociétés, la sexualité masculine est pensée comme domination. Néanmoins, de même qu'il y a des sociétés politiques moins inégalitaires que d'autres, il y a des sociétés où les femmes sont moins opprimées que dans d'autres. Même s'il existe une tendance « naturelle » à la domination et donc à l'inégalité, toutes les sociétés ne font pas les mêmes choix. On peut donc penser qu'il n'y a pas de fatalité ni à l'inégalité ni à la domination. ■

(1) S. C. Strum, *Presque humain. Voyage chez les babouins,* Eshel, 1990.
(2) F. de Waal, *De la réconciliation chez les primates,* Flammarion, 2002.
(3) Claude Lévi-Strauss, *Tristes tropiques,* Plon, 1955.
(4) James C. Scott, *Homo domesticus,* La Découverte, 2019.
(5) Pierre Clastres, *La Société contre l'État,* Les Éditions de Minuit, 1974.
(6) Alfredo González-Ruibal, *An Archaeology of Resistance*, Rowman & Littlefield, 2014 (en anglais) ; Svend Hansen et Johannes Müller (dir.), « Rebellion and Inequality in Archaeology », Habelt, 2017 (en anglais).
(7) David Graeber et David Wengrow, « Comment changer le cours de l'histoire (ou au moins du passé) », *Revue du Crieur, 11,* 2018.
(8) Jared Diamond, *Effondrement,* Gallimard, 2006.
(9) Colin Renfrew, « Ancient Civilization and Trade », Jeremy A. Sabloff et C. C. Lamberg-Karlowsky (dir.), University of New Mexico Press, p. 3, 1975 ; Morton H. Fried, *On the Evolution of Social Stratification and the State,* Bobbs-Merrill, 1960.

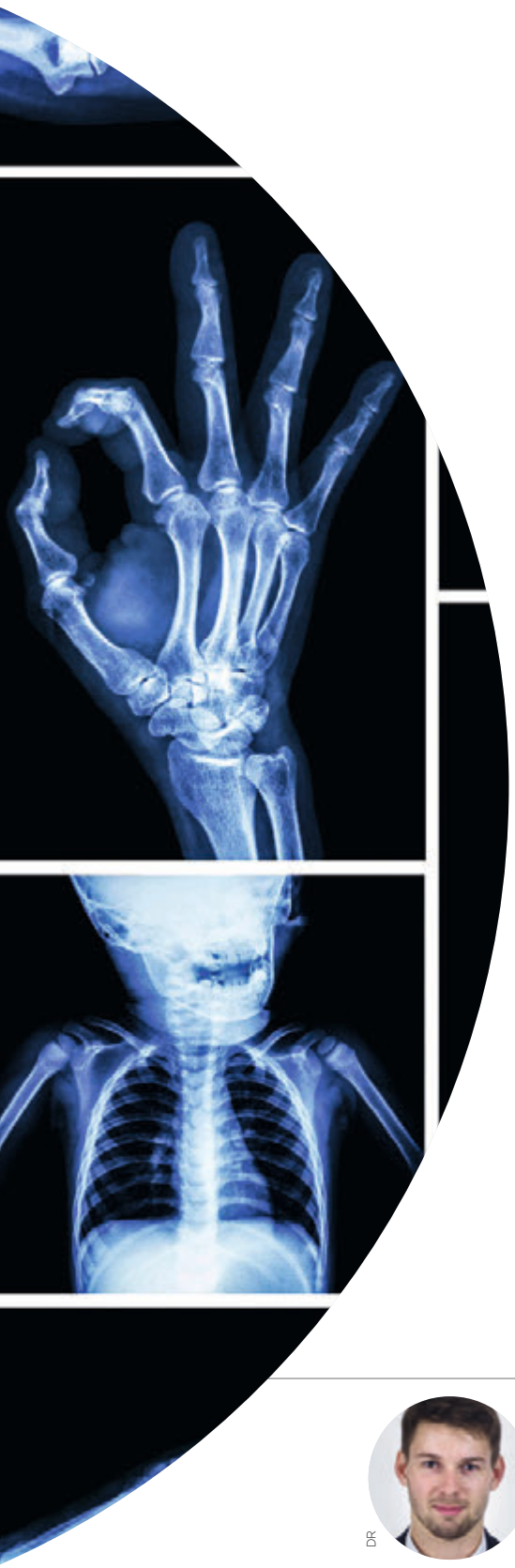


PHOTO12/ALAMY/PUWADOL ET KITTIPONG

La nouvelle technologie de protection des données

L'enjeu de la confidentialité des données sensibles est crucial dans le développement de notre monde numérique. Comment limiter les risques liés à leur exposition tout en renforçant les opportunités pour un usage plus sûr ? Des techniques existent. Issues de la cryptographie et du monde de la sécurité, elles répondent à ces enjeux, notamment dans le cadre d'une utilisation contrôlée et sûre de l'intelligence artificielle (IA). Ces outils permettent à des institutions de collaborer sans perte de contrôle sur leurs données, en particulier dans le domaine de la santé. Quels sont les avancées récentes, les limites et les cas typiques d'utilisation ?

DR

Théo Ryffel
DOCTORANT À L'ENS ET INRIA PARIS SOUS LA SUPERVISION DE DAVID POINTCHEVAL ET FRANCIS BACH
Il travaille sur le développement d'algorithmes d'intelligence artificielle respectueux de la vie privée. En parallèle de sa thèse, il a cofondé Arkhn, une start-up basée à Paris qui collabore avec les établissements de soins pour les aider à retrouver la souveraineté sur leurs données.

Quelle que soit l'opinion que nous ayons sur l'intelligence artificielle (IA), elle fait déjà partie de notre quotidien. Lorsque nous écrivons un message sur notre téléphone, un algorithme nous suggère le mot suivant que nous pourrions utiliser. Quand nous nous connectons à un site Internet, quelques instants avant que la page ne s'affiche, une enchère éclair a lieu entre différents annonceurs qui analysent notre profil d'internaute et déterminent la publicité la plus à même de capter notre attention. Lors du visionnage d'une série, d'un film ou d'un clip musical, l'application nous propose ce qu'elle estime être le meilleur choix suivant pour nous inciter à rester connecté.

Parallèlement à ces applications pratiques ou commerciales, il en existe d'autres directement bénéfiques pour la société. Parmi tant d'autres, celles facilitant la dépollution via l'identification des déchets sur des images aériennes, prévenant des défaillances ou des fuites dans les infrastructures, ou bien encore aidant au diagnostic des patients dans le milieu hospitalier. Arrêtons-nous sur ce dernier exemple, car le domaine de la santé est très particulier. En effet, alors que c'est l'un de ceux où l'IA pourrait avoir l'impact sociétal le plus fort, c'est paradoxalement celui où elle est la moins présente. Rappelons tout d'abord qu'en France, chaque établissement de soins est responsable du stockage de ses données de santé. Leur accès y est très encadré, et doit s'opérer au cas par cas, tant pour les équipes de recherche clinique que pour les entreprises spécialisées en IA. Ainsi, il est aisé de disposer de bases contenant plusieurs millions d'éléments si l'on veut entraîner un modèle à détecter des espèces d'animaux par exemple – la reconnaissance d'image étant une application emblématique de l'IA. Mais les cohortes de patients disponibles dépassent rarement les centaines d'individus pour résoudre des problèmes de santé publique, comme l'étude des comportements dépressifs. Pourtant, les données existent, qu'il s'agisse des dossiers médicaux bien sûr, mais aussi des contenus de messagerie ou des relevés bancaires – les habitudes de consommation ou bien le vocabulaire employé pouvant être utiles pour ce genre d'étude. Seulement, l'information est « silotée » : elle n'est pas partagée car cela pourrait porter gravement atteinte au respect de la vie privée si un usage malveillant en était fait. De ce point de vue, la révolution du Big Data en santé n'est pas encore survenue.

L'absolue nécessité de protection des données de santé, telle qu'elle est consacrée par le RGPD (lire p. 75), n'est évidemment pas négociable. Il s'agit donc de trouver un cadre qui assure la sécurité des données tout en permettant l'innovation, avec la promesse d'obtenir des avancées inégalées grâce à l'exploitation des données à l'échelle nationale. Ce constat est aujourd'hui partagé par de nombreux acteurs. Il nécessite toutefois de trouver des solutions adaptées à un sujet aussi sensible.

Pour cela, nous pouvons revisiter le respect de la vie privée sous l'angle de l'intégrité contextuelle telle que la conçoit Helen Nissenbaum, professeure à

L'APPRENTISSAGE FÉDÉRÉ EN CINQ ÉTAPES

1. Conception. Un modèle d'apprentissage (réseau de neurones) est créé dans un laboratoire de recherche.

INFOGRAPHIES: BRUNO BOURGEOIS

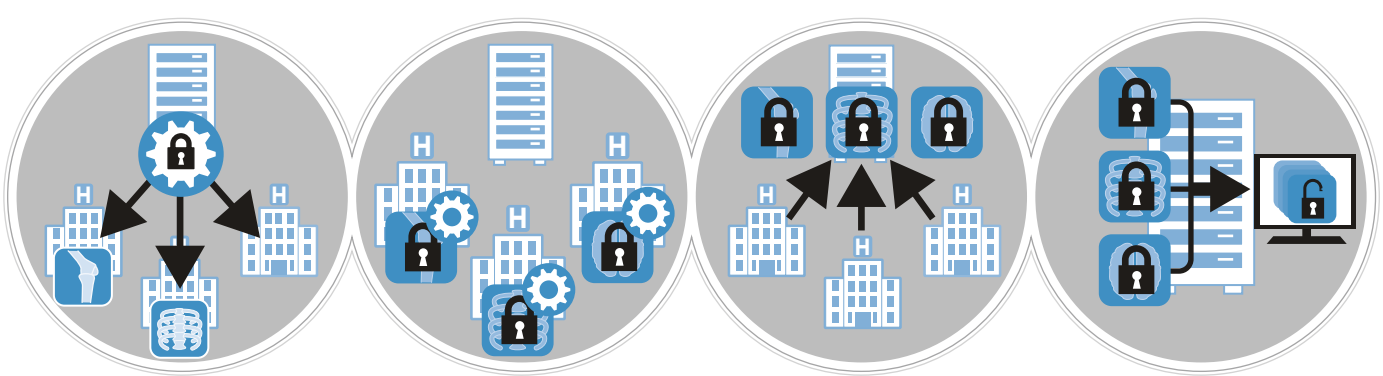
l'université Cornell Tech (États-Unis). Selon cette conception, la vie privée est respectée lorsqu'un flux d'information transmis d'un individu à un autre via un canal dédié est « approprié » pour la personne concernée, qu'il s'agisse de l'expéditeur, du destinataire, du type d'information et du principe de transmission. Par exemple, la transmission par un patient de son compte rendu médical à son médecin – via une messagerie sécurisée – peut probablement être considérée comme un flux d'information approprié, qui ne nuit pas au patient. En d'autres termes, le respect de la vie privée s'exerce si l'on révèle uniquement des informations nécessaires à des acteurs légitimes.

LAISSER LES DONNÉES OÙ ELLES SONT

Cette approche renverse la notion habituelle de respect de la vie privée, car posséder des canaux pour échanger des flux d'information appropriés permet non seulement de limiter les effets négatifs de la diffusion inadaptée d'informations, mais aussi de renforcer les partages d'information là où ils sont légitimes.

Précisons ce que peuvent être ces canaux dans le contexte de ce que l'on nomme « l'apprentissage profond » dans le domaine de l'IA. Trois techniques sont utilisables séparément ou conjointement en fonction du contexte de collaboration : l'apprentissage fédéré, la confidentialité différentielle et le calcul sur des données chiffrées. Pour illustrer le propos, prenons l'exemple emblématique d'un laboratoire qui veut entraîner un modèle d'IA – en général un algorithme sous forme de réseau de neurones – à détecter des pneumonies chez des patients à partir de données d'imagerie de poumons. La méthode standard pour ce type de tâche consiste à importer toutes les images sur un serveur central pour y entraîner le modèle. Cela pose plusieurs problèmes. Le premier est que le flux d'information n'est pas nécessairement approprié à la tâche souhaitée, en l'occurrence détecter si un patient est atteint de pneumonie. Car il n'est peut-être pas utile pour cela de transférer toutes les données d'imagerie pulmonaire. Le second est qu'il est très lourd de transférer des données volumineuses comme celles d'imagerie. La question du lieu de stockage est également épineuse : faut-il stocker les données sur un serveur ? Si oui, ce serveur doit-il être national, ou pas forcément ? Si non, dans quel établissement le faire ? Autant de questions qui se sont concrètement posées lorsque j'ai commencé en 2018 un projet d'imagerie médicale à l'Imperial College London (Royaume-Uni) ; elles m'ont conduit à explorer une autre manière de faire de l'IA en optant pour l'apprentissage fédéré. En effet, celui-ci résout ces questions en renversant le processus classique : il consiste à laisser les données là où elles sont hébergées – dans les centres hospitaliers par exemple – et à entraîner sur place le réseau de neurones.

L'apprentissage fédéré a pris son essor en 2017, sous l'impulsion des géants technologiques qui ont d'abord voulu l'appliquer aux téléphones. L'usage envisagé est la prédiction du mot suivant dans l'écriture de messages personnels, pour lesquels transférer les données personnelles vers des serveurs centraux serait peu acceptable du point



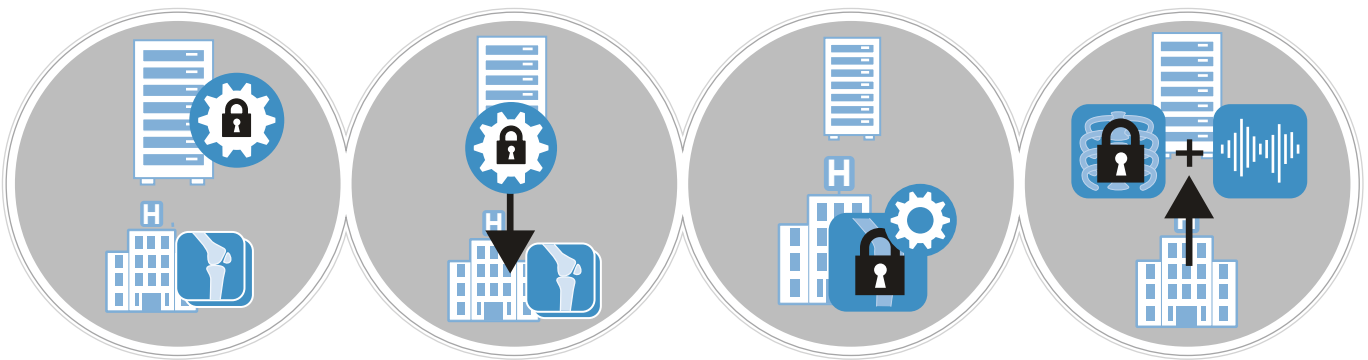
2. Envoi. Le modèle, non entraîné, est copié en trois exemplaires, envoyés à chaque centre hospitalier.

3. Apprentissage local. Chaque copie du modèle est entraînée sur les données médicales locales.

4. Retour du modèle. Après une période d'apprentissage, chaque centre envoie son modèle entraîné à son concepteur.

5. Agrégation. Les paramètres du modèle sont agrégés en un unique réseau de neurones.

APPRENTISSAGE AVEC CONFIDENTIALITÉ DIFFÉRENTIELLE



1. Le modèle appartient au laboratoire et les données au centre hospitalier.

2. Le modèle est envoyé au centre hospitalier.

3. Le modèle est entraîné localement.

4. Le modèle entraîné est renvoyé au laboratoire, mais avec un aléa qui ne permet pas de retrouver les données individuelles.

de vue de la vie privée. Aujourd'hui, ce type d'apprentissage s'applique dans des contextes variés, selon que peu de parties possèdent les données ou qu'elles soient des millions, comme dans le cas des téléphones ; avec des capacités de calcul et de communication réduites (sur les téléphones) ou avec plus de moyens dans le cas des établissements de soins par exemple. Mais l'idée est toujours la même : ne pas transférer les données personnelles à l'extérieur de leur lieu d'hébergement initial et faire « sortir » uniquement les modèles d'apprentissage. Ce sujet évolue très vite et fait l'objet de nombreuses recherches. En France, le centre Inria Lille s'intéresse à ces questions et des start-up en santé telles que Owkin et Arkhn (que j'ai cofondée) participent au développement d'outils open source pour faire de l'apprentissage fédéré.

LES ATTAQUES PAR EXTRACTION

Dit ainsi, l'apprentissage fédéré semble la solution idéale. Toutefois, le transfert de gros modèles d'apprentissage comprenant des millions de paramètres à ajuster a un impact non négligeable sur la bande passante. Par ailleurs, il est nécessaire que les données entre les différentes bases soient standardisées. Afin de réduire l'usage de la bande passante, il est possible de ne transférer que certaines « couches » des réseaux de neurones ou encore de compresser les paramètres du modèle, mais cela peut réduire la qualité d'apprentissage. C'est l'un des enjeux de travaux de recherche en cours dans ce domaine. Pour le problème de standardisation, les centres qui reçoivent le modèle à entraîner doivent utiliser une structure de données uniforme. En effet, le modèle ne peut pas s'adapter à la façon dont les données sont stockées, qui peut être très différente d'un centre hospitalier à un autre. Un format d'échange interopérable, nommé FHIR (pour « *Fast Healthcare Interoperability Resources* ») est ainsi développé depuis 2014 par une association américaine. En France, nous aidons, avec la société Arkhn, les établissements de soins à convertir l'ensemble de leurs données de soin à ce format FHIR afin qu'ils puissent participer à des projets d'apprentissage fédéré.

Comment la notion d'apprentissage fédéré s'inscrit-elle dans la démarche d'intégrité contextuelle évoquée plus haut ? Pour la tâche que nous avons considérée, nous n'avons nul besoin d'accéder aux données directement, mais seulement au modèle entraîné : il n'est donc pas approprié de les exposer en les centralisant toutes sur un serveur si l'on peut entraîner le modèle à distance. Le flux d'information de l'apprentissage fédéré est donc composé des versions mises à jour du modèle par les différentes parties prenantes. Et l'agrégation de ces versions est faite soit par les parties directement, soit par une tierce personne. Mais est-il possible que le modèle révèle plus d'informations que ce pour quoi il a été conçu ? En particulier, peut-il révéler des informations spécifiques sur les données sur

lesquelles il a été entraîné, alors même que l'on a décidé de ne pas exposer ces données ? La réponse est oui. En raison, entre autres, de leur taille importante (plusieurs millions de paramètres), les modèles peuvent en effet mémoriser des informations spécifiques sur certaines données d'entraînement. Que peut-on savoir exactement ? Pour le déterminer, des travaux se sont penchés sur les diverses informations que l'on peut extraire de ces modèles, ce qu'on appelle des « attaques par extraction ». Cela va de la reconstruction pure et simple de certaines données d'apprentissage à des manipulations plus subtiles, comme identifier si une donnée figurait ou non dans le jeu d'entraînement. Étant donné la capacité de certains modèles à laisser échapper des informations sensibles, l'acceptabilité d'une telle fuite dépend du contexte de la collaboration entre les parties prenantes. Plusieurs cas de figure se présentent donc. Ainsi, s'il s'agit d'établissements hospitaliers qui auraient pu librement échanger leurs données, il est probable que de telles fuites ne compromettent pas le respect de la vie privée des patients, pour autant que le modèle ne soit pas rendu public ou partagé avec d'autres acteurs ou entreprises. Mais dans certaines situations, le modèle doit être largement partagé ou publié. Ce serait le cas pour ces applications mobiles très répandues de détection de mélanome qui permettent à chacun de photographier n'importe quelle lésion cutanée afin qu'un algorithme en évalue la nature directement sur le téléphone par des techniques d'apprentissage. Un informaticien un peu expérimenté pourrait inspecter son téléphone pour accéder à ce modèle. Une deuxième technique doit alors être mise en œuvre afin de résister aux attaques par extraction que nous venons d'évoquer. Elle s'appelle la « confidentialité différentielle » et va un cran plus loin dans la protection des données.

ALÉAS ET CONFIDENTIALITÉ

Dans sa forme actuelle, celle-ci a été théorisée en 2014 par l'informaticienne américaine Cynthia Dwork, professeure à l'université Harvard (États-Unis). Elle peut se formaliser ainsi : un algorithme réalise un certain niveau de confidentialité différentielle si, étant donnés en entrée deux jeux de données arbitraires qui ne diffèrent que d'un individu, sa distribution de sortie ne diffère au maximum que d'une certaine marge. L'intuition derrière la formule proposée par Cynthia Dwork est qu'ajouter ou retirer un individu d'un jeu de données ne devrait pas modifier sensiblement le comportement d'un algorithme qui respecte la confidentialité différentielle. Cela signifie donc qu'un individu ne doit pas avoir à lui seul d'influence sur l'algorithme. Autrement dit, ce dernier ne doit pas révéler d'information à propos d'un individu isolé. Le concept de confidentialité différentielle ne s'applique pas seulement à l'apprentissage profond, mais aussi à d'autres domaines tels que les statistiques en général et à tout procédé d'agrégation à partir de bases de données d'individus. Les techniques utilisées pour obtenir de la confidentialité différentielle se fondent souvent sur l'addition d'un aléa, ce qu'on appelle du « bruit ». Prenons l'exemple d'une étude sociologique sur les pratiques religieuses d'une population. On demande à chaque personne si elle est croyante ou non mais, auparavant, elle doit lancer une pièce en l'air deux fois sans que l'on puisse voir le résultat. Si elle obtient « face » sur le premier lancer, elle doit donner sa vraie réponse, et si elle obtient « pile », elle répond en fonction du second lancer, par exemple oui pour « pile » et non pour « face ». Imaginons que cette étude soit menée sur un grand nombre de personnes avec un score final de 60 % affirmant qu'elles sont croyantes. Sachant que la moitié des personnes interrogées a répondu au hasard et que l'autre l'a fait honnêtement, on en déduit que la proportion réelle de personnes croyantes est de 70 %. Ainsi, le résultat de l'étude est préservé, mais on ne peut pas savoir si une personne en particulier est croyante ou non.

L'idée est de ne pas transférer les données personnelles à l'extérieur de leur lieu d'hébergement initial

En apprentissage statistique de façon générale, le principe consiste à choisir un aléa finement calibré pour obtenir le bon niveau de confidentialité. Il y a en effet un équilibre à trouver entre un bruit trop faible pour assurer la sécurité requise et un bruit trop important qui risquerait de saboter l'entraînement, faisant chuter massivement l'efficacité du modèle. La réduction des performances des modèles est l'un des inconvénients majeurs

de cette méthode, car elle peut rendre le modèle beaucoup moins pertinent en pratique.
La confidentialité peut être accrue en combinant ces deux techniques : l'apprentissage fédéré et la confidentialité différentielle. Par exemple, il est possible d'utiliser la confidentialité différentielle lors de la phase d'apprentissage local de chaque centre qui possède des données. Ainsi, si nous revenons à notre exemple des données de santé, dans l'hypothèse où le laboratoire souhaite réutiliser le modèle en dehors des centres hospitaliers qui ont participé à l'entraînement, combiner les deux méthodes assure que les données ne pourront pas être compromises, ni directement, ni indirectement, en exploitant le réseau de neurones.

Un dernier point reste à aborder. Imaginons que le laboratoire ne souhaite pas rendre visible aux établissements le modèle qui est entraîné – pour des questions de propriété intellectuelle ou parce qu'il a déjà été pré-entraîné ailleurs et représente un produit stratégique sur lequel il souhaite garder l'exclusivité. Peut-on dans ce cas chiffrer le modèle avant de le partager avec les hôpitaux et faire l'entraînement de façon complètement chiffrée, de manière à garder la confidentialité sur le modèle ? Oui, à une condition : celle de pouvoir calculer sur des données chiffrées, autrement dit de calculer sans connaître ce sur quoi on effectue les calculs. Des techniques cryptographiques récentes le permettent.

Le principe du protocole TFHE consiste à ajouter du bruit à chaque opération jusqu'à rendre le déchiffrement impossible

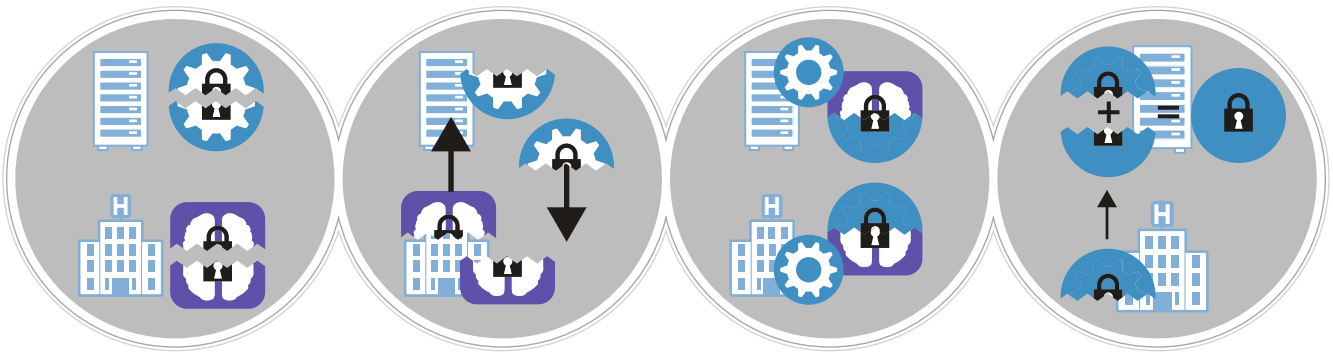
LE PARTAGE DE SECRET

Deux grandes familles d'outils autorisent en effet de faire du calcul sur des données chiffrées. La première, celle des méthodes de chiffrement homomorphe, repose sur des problèmes cryptographiques réputés difficiles en démontrant que parvenir à déchiffrer des secrets reviendrait à résoudre l'un de ces problèmes. La seconde famille – sur laquelle je travaille dans le cadre de ma thèse – regroupe les techniques de calcul multipartite et repose sur le partage de secret entre plusieurs

APPRENTISSAGE AVEC CALCUL CHIFFRÉ MULTIPARTITE

1. Les modèles et les données sont chiffrés.

parties. Pour mieux comprendre, examinons le fonctionnement de ces techniques sur des exemples.
Le chiffrement de Paillier a été proposé en 1999 par le cryptographe français Pascal Paillier. Le secret à résoudre, si l'on veut casser ce chiffrement, repose sur la difficulté à factoriser un nombre N formé par le produit de deux grands nombres premiers *p* et *q*. Il est additivement homomorphe : il est possible de faire l'addition de deux valeurs chiffrées seulement en manipulant les chiffrés (les objets qui encodent les secrets) sans rien apprendre des valeurs sous-jacentes. Toutefois, pour calculer de manière générale sur des données – et donc entraîner des modèles –, faire des additions ne suffit pas. Il faut aussi pouvoir effectuer des multiplications de valeurs chiffrées, ce que le chiffrement de Paillier ne permet pas. Des protocoles plus récents permettent des multiplications sur les chiffrés. C'est le cas de TFHE, introduit en 2018 par Ilaria Chillotti, alors au laboratoire de mathématiques de Versailles (1). Ce protocole est complètement homomorphe car il permet les additions et les multiplications. Le principe consiste à ajouter du bruit pour cacher les secrets. Le bruit croît à chaque opération jusqu'à rendre le déchiffrement impossible, ce qui nécessite d'invoquer régulièrement une opération spéciale (et coûteuse) pour réduire le bruit. Le chiffrement homomorphe est intéressant car il permet de déléguer un calcul entier sans avoir à intervenir, sauf pour le déchiffrement final. Dans notre exemple, nous pourrions imaginer que le laboratoire chiffre les paramètres du modèle et en envoie une copie à chaque centre hospitalier pour qu'il l'entraîne sur ses données.
Le calcul multipartite repose, lui, sur le partage de



2. On coupe le modèle et les données en morceaux aléatoires.

3. Les morceaux sont échangés.

4. L'entraînement est fait à travers un calcul réparti.

5. Le modèle entraîné est reconstruit.

secret. Le partage le plus simple (additif) fonctionne ainsi : étant donné une valeur secrète, disons un salaire, on coupe cette valeur en deux morceaux aléatoires dans un grand espace (tel celui des entiers encodés sur 64 bits), dont la somme est égale à la valeur initiale. Chaque morceau est envoyé à une partie différente, de sorte que chacune ne reçoit qu'un nombre aléatoire qui ne révèle rien de la valeur secrète. Pour la reconstruire, les parties doivent mettre en commun leurs morceaux et les additionner. Ce partage de secret permet aussi de calculer des sommes sur des valeurs secrètes. Il suffit que chaque partie calcule la somme des parts des valeurs qu'elle possède. Il est également possible de construire plus que deux parts pour partager le secret entre un nombre arbitraire de parties. Ainsi, on pourrait calculer aisément une moyenne de n salaires sans révéler aucun salaire. Mais plus il y a de parties impliquées, plus il y a de risques que l'une d'elles quitte le protocole et rende la reconstruction impossible. Des protocoles résistant à la défection de n-k parmi n parties impliquées ont toutefois été développés, comme le partage de Shamir, proposé par le cryptographe israélien Adi Shamir (2).

En pratique, ce sont les partages à trois ou quatre parties qui offrent les protocoles les plus efficaces pour additionner, multiplier et faire des comparaisons. Ces deux dernières opérations sont cruciales pour modéliser des réseaux de neurones et la propagation des signaux d'une couche à une autre du réseau de neurones. Toutefois, elles nécessitent de faire communiquer les différentes parties, si bien que le nombre d'échanges nécessaires est un critère important lorsqu'on choisit un protocole de partage de secret. Je m'intéresse en particulier aux protocoles qui réduisent le nombre d'interactions pour calculer une comparaison de façon privée. En effet, on peut accélérer les calculs avec des processeurs graphiques spécialisés (comme les GPU), mais on est limité dans les échanges par la vitesse de la lumière. Une donnée ne transitera jamais en moins de 30 ms entre Paris et San Francisco. En pratique, la latence est même de 150 ms, ce qui fait que chaque échange économisé offre un gain de rapidité mesurable. Nous avons dernièrement optimisé un protocole qui n'a besoin que d'une unique interaction par comparaison, au détriment de calculs plus importants que nous tentons d'accélérer grâce à des GPU. Ce protocole est à présent intégré à la librairie de code PySyft, en accès libre, qui propose des outils prêts à l'emploi pour faire de l'IA respectueuse de la vie privée (3).

La protection des données ne peut pas être une finalité – opposée alors à tout progrès scientifique. Elle doit s'exercer comme un moyen afin que les acteurs puissent les partager de manière sécurisée et renforcer leurs collaborations. L'approche d'Helen Nissenbaum, qui consiste à analyser la protection de la vie privée sous le prisme de l'intégrité contextuelle, n'est pas la seule façon d'aborder cette question. Néanmoins, et c'est là son grand mérite, elle défend une vision où le développement des méthodes qui protègent la vie privée ne conduira pas à une société du secret mais à une société de la coopération. ■

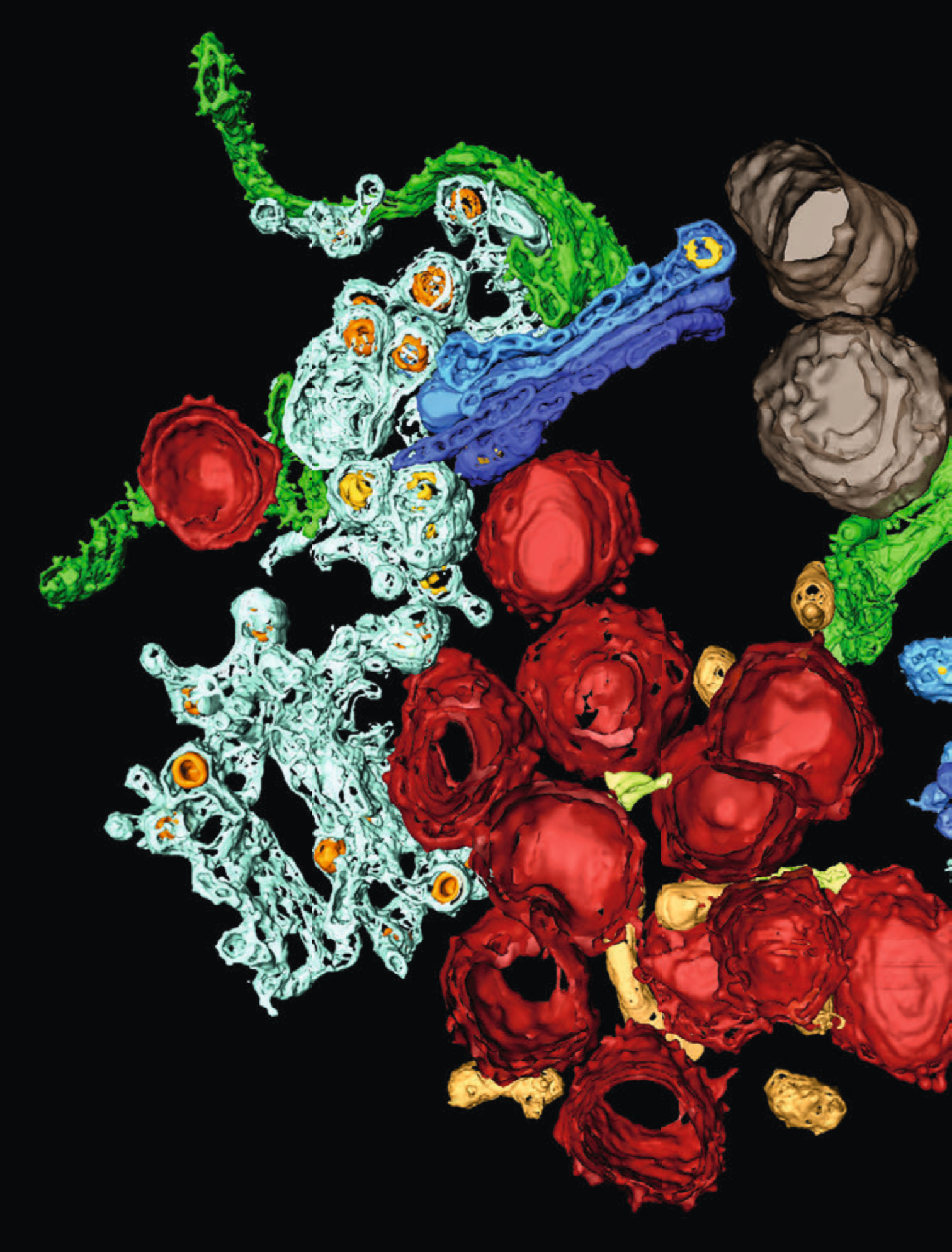
Le RGPD en vigueur

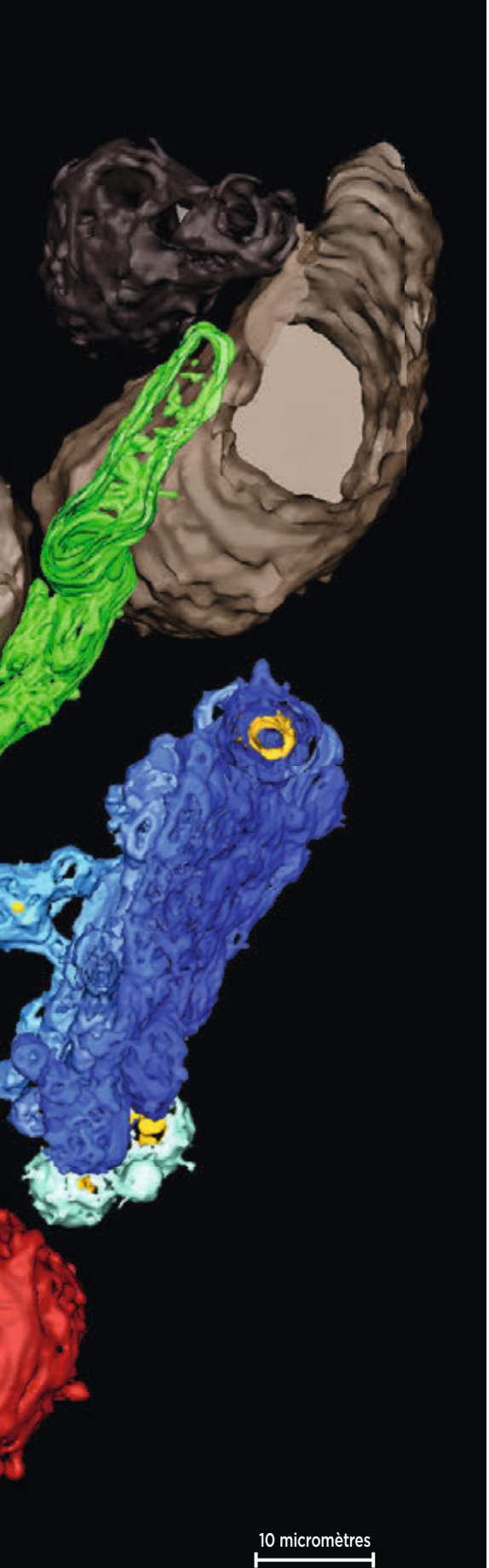
Le règlement général sur la protection des données (RGPD), entré en vigueur en 2018, redéfinit et élargit la notion de données de santé. Il impose le consentement explicite des individus à la collecte et au traitement de leurs données, et ce dans une finalité qui doit être déterminée et légitime : elles ne peuvent pas être réutilisées ultérieurement à d'autres fins. Le RGPD indique enfin que tout système d'information ou base de données doit prendre en compte la notion du respect de la vie privée dès sa conception et en réserver l'accès à des personnes désignées.

(1) I. Chillotti, « Vers l'efficacité et la sécurité du chiffrement homomorphe et du cloud computing », thèse de doctorat en informatique soutenue le 17 mai 2018 à l'université Paris-Saclay (theses.fr/2018SACLV020).

(2) A. Shamir, *Communications of the ACM, 22*, 11, 1979.

(3) T. Ryffel *et al.*, NeurIPS, 2018 (github.com/OpenMined/PySyft).





YANNICK SCHWAB; EUROPEAN MOLECULAR BIOLOGY LABORATORY, HEIDELBERG

Portrait d'un virus planétaire

La terrible renommée du virus SARS-CoV-2, responsable de la pandémie de Covid-19, est malheureusement devenue mondiale. L'effort de recherche pour en percer les secrets est inédit, et lui aussi international. En imagerie, plusieurs équipes ont réalisé des performances, saisissant le virus en action dans les cellules infectées. Les clichés aident les virologues à décrypter ce nouveau coronavirus en vue d'améliorer les traitements. Pour les obtenir, les chercheurs ont convoqué toute la panoplie des techniques de pointe : microscopie électronique, cryo-microscopie, ainsi que des programmes de simulation moléculaire. Plongée à l'intérieur d'un virus aux multiples ressources.

AU CŒUR DE L'INFECTION

Reconstitution en 3D, grâce à la tomographie électronique, des différentes composantes (organelles) à l'intérieur d'une cellule infectée par le SARS-CoV-2. En rouge, les vésicules où se réplique l'ADN viral ; en marron, les mitochondries (usines à énergie des cellules) ; en bleu, l'appareil de Golgi (lieu de transfert, de tri et de maturation des protéines) ; en vert, le réticulum endoplasmique.

Réaliser la photo d'identité du virus qui bouleverse la planète depuis plus d'un an nécessite des moyens techniques particuliers. En présence d'un diamètre moyen de 100 nanomètres – 1 000 fois inférieur à celui d'un cheveu –, il est nécessaire d'utiliser la microscopie électronique. À la différence des microscopes optiques qui exploitent les propriétés de la lumière visible pour visualiser un très petit objet, les microscopes électroniques fonctionnent en bombardant d'électrons l'objet à observer. Les scientifiques reconstruisent ensuite des clichés en observant la façon dont les électrons ont interagi avec leur cible.

Les toutes premières images du virus responsable du Covid-19, le SARS-CoV-2, ont été réalisées à partir d'échantillons prélevés chez des malades, puis mis en culture en laboratoire, par microscopie électronique à transmission. C'est ainsi que le virus est apparu avec sa couronne de piques (spicules ou « spike ») si caractéristique de la famille des coronavirus (lire p. 82).

Toutefois, afin d'observer en trois dimensions ce qui se déroule au cœur d'une cellule infectée, les biologistes doivent combiner la microscopie électronique à d'autres outils de pointe. C'est ainsi qu'ont procédé les équipes du virologue Ralf Bartenschlager, de l'université de Heidelberg, en Allemagne, et de Yannick Schwab, responsable de la plateforme d'imagerie du laboratoire européen de biologie moléculaire (EMBL, Heidelberg) (1). Le portrait ci-contre en 3D d'une cellule en culture infectée par le virus a été obtenu par microscopie électronique à faisceau d'ions focalisé *(focused ion beam-scanning electron microscopy)*. *« Cette technique d'imagerie permet d'automatiser la production d'images sériées,* précise Yannick Schwab. *Ensuite, à l'aide de logiciels dédiés, ces images sont assemblées en 3D. Cela nous permet de naviguer dans un volume de 8 000 micromètres cubes. Grâce à des techniques d'intelligence artificielle, utilisées pour la reconnaissance des différentes organelles* [compartiments internes de la cellule, NDLR] *définies et connues, nous pouvons segmenter les différentes parties d'une cellule infectée, de sorte que l'on voit apparaître le noyau, les mitochondries* [usines à énergie des cellules, NDLR], *etc.* »

Les biologistes observent ainsi très précisément les différentes parties de la cellule et leur organisation. *« Le virus bouleverse l'architecture interne de la cellule, il détourne des organelles qui assurent une fonction déterminée »*, poursuit Yannick Schwab. Une organelle est particulièrement ciblée par le virus : le réticulum endoplasmique. Situé à proximité du noyau cellulaire et constitué d'un long réseau de membranes, il est le lieu de fabrication de protéines. *« Grâce à nos observations, on s'aperçoit que, quelques heures après l'infection d'une cellule par le virus, son réticulum est désorganisé. Ses membranes sont utilisées par le virus pour créer des vésicules à double membrane à l'intérieur desquelles le code génétique viral, l'ARN, est multiplié »*, explique Yannick Schwab. Ces vésicules à double membrane correspondent aux bulles rouges que l'on observe sur les images en 3D aux pages 76 et 79. On en voit partout, ce qui signifie que la cellule est bien infectée : chez un patient avec une telle infection, la charge virale serait importante.

Les copies d'ARN viral sortent de ces vésicules spéciales et se retrouvent dans un autre compartiment cellulaire, intermédiaire entre le réticulum endoplasmique et l'appareil de Golgi, nommé amas vestibulaire-tubulaire ou Ergic. C'est là que se produit l'empaquetage de l'ARN viral. Il s'associe

YANNICK SCHWAB; EUROPEAN MOLECULAR BIOLOGY LABORATORY, HEIDELBERG

UNE CELLULE ASSIÉGÉE

Cette cellule de laboratoire est infectée depuis 24 heures par le virus SARS-CoV-2; on observe en rouge les vésicules où se réplique l'ARN viral.

2 micromètres

avec des protéines sur la membrane de l'Ergic et forme des virions, des particules virales de SARS-CoV-2. Celles-ci sont ensuite emballées dans des vésicules qui seront transportées vers la membrane cellulaire ; les virus ainsi largués vers l'extérieur sont prêts à infecter d'autres cellules.

> **« Nous mettons toutes nos données d'imagerie à la disposition de la communauté scientifique »**
> **Yannick Schwab,** laboratoire européen de biologie moléculaire, Heidelberg

« Ce cycle ressemble beaucoup à ce qui a déjà été caractérisé pour d'autres bêta-coronavirus déjà connus, tel le MERS ou le SARS-CoV-1. Cependant, nous avons observé de nouveaux comportements, notamment l'association entre les vésicules de réplication du virus avec des peroxysomes », note Yannick Schwab. Le peroxysome est une petite structure sphérique délimitée par une membrane lipidique. Il a habituellement pour rôle de détoxifier la cellule en dégradant certaines molécules qui y rentrent, comme les acides gras ou l'alcool, grâce à la bêta-oxydation. Comment interpréter cette observation ? *« Plusieurs hypothèses sont étudiées : soit cette association aide le virus à se reproduire, soit le peroxysome est l'un des mécanismes de défense de la cellule pour se débarrasser du virus,* suggère le spécialiste d'imagerie. *Des recherches préliminaires en virologie ont montré que cela peut être l'un ou l'autre. Comme le peroxysome est un site de production de certains lipides, il est envisageable que le virus parvienne à kidnapper le peroxysome pour la production des lipides dont il a besoin afin d'augmenter la quantité de membrane nécessaire pour être empaqueté… Pour le moment, rien de tout cela n'a été confirmé. »*

Autre phénomène observé par les équipes allemandes : la formation d'une cage de filaments (des filaments intermédiaires qui participent au cytosquelette de la cellule) autour de l'endroit où se concentre la majorité des vésicules de réplication de l'ARN viral. Là aussi, cette observation soulève des interrogations : est-ce que cette cage de filaments intermédiaires résulte de l'accumulation anarchique de ces vésicules qui poussent tout à l'intérieur de la cellule, ou est-ce un mécanisme de défense de la cellule, qui essaie d'isoler ces vésicules ? Autant de questions dont les virologues vont pouvoir s'emparer.

Ces observations sont le fruit d'une mobilisation intense des équipes au moment du confinement. *« La grande image de cellule infectée représente trois semaines de travail de la part de sept personnes en continu…* raconte Yannick Schwab. *En un mois, nous avons obtenu 1 térabit de données. D'ailleurs, je tiens à souligner que nous mettons l'ensemble des données acquises par notre plateforme d'imagerie à la disposition de la communauté scientifique. »*

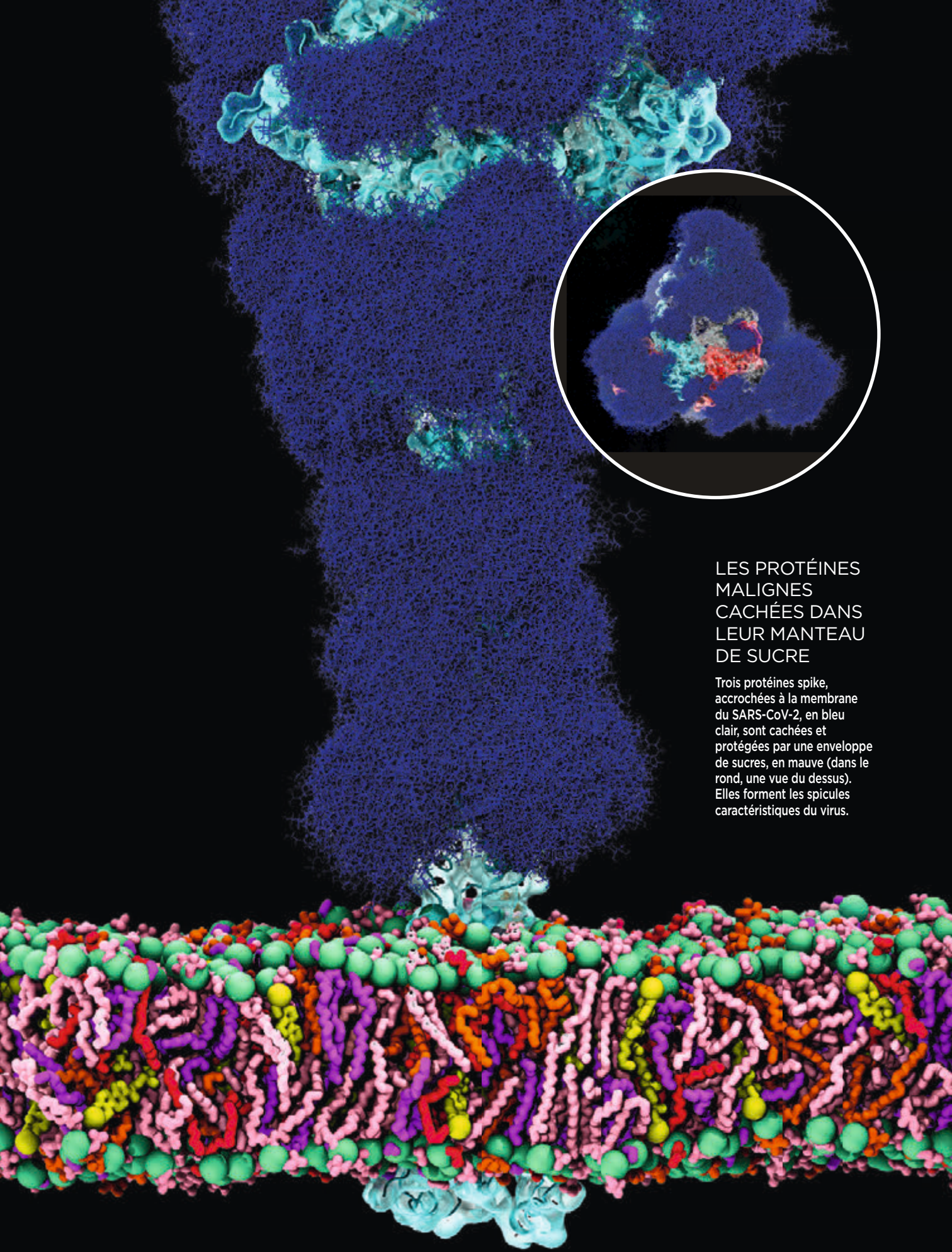
Le niveau de résolution de la cryo-microscopie a également permis aux virologues d'observer finement le virus, et notamment son enveloppe et sa fameuse couronne de spicules. Ces spicules qui tapissent la surface du virus jouent un rôle crucial dans l'infection : ils s'accrochent à la protéine ACE2 présente à la surface des cellules de nos voies respiratoires afin que le virus puisse y pénétrer. Les techniques d'imagerie ont permis de visualiser la structure en forme de fleur de ces spicules, constitués de trois protéines « spike » encastrées les unes dans les autres, ainsi qu'une longue tige ancrée à l'enveloppe virale (voir l'image p. 81).

FOCUS SUR LE MOUVEMENT DU SPICULE

À l'Institut Max-Planck de biophysique, à Francfort-sur-le-Main, en Allemagne, les équipes de Martin Beck et Gerhard Hummer ont utilisé des images des protéines « spike » intégrées dans la membrane du virus afin de modéliser les mouvements de ces protéines (2). *« Nous avons ainsi observé que le spicule peut onduler avec toutes sortes d'angles de courbure »*, souligne Martin Beck. Cette flexibilité du spicule paraît utile : en bougeant ainsi à la surface de nos cellules épithéliales, celui-ci augmente la probabilité de rencontrer la protéine ACE2, qu'il utilise pour se fixer. Autre observation importante : ces spicules sont cachés par des molécules de sucres (glucose). Elles tourbillonnent autour des spicules et les masquent, ce qui les protège contre les attaques de nos anticorps.

À partir des images obtenues par cryo-microscopie électronique, où l'on congèle un échantillon avant de l'observer (lire l'encadré p. 83), l'équipe de

LORENZO CASALINO (IMAGE), ROMMIE AMARO, AMARO LAB, UC SAN DIEGO

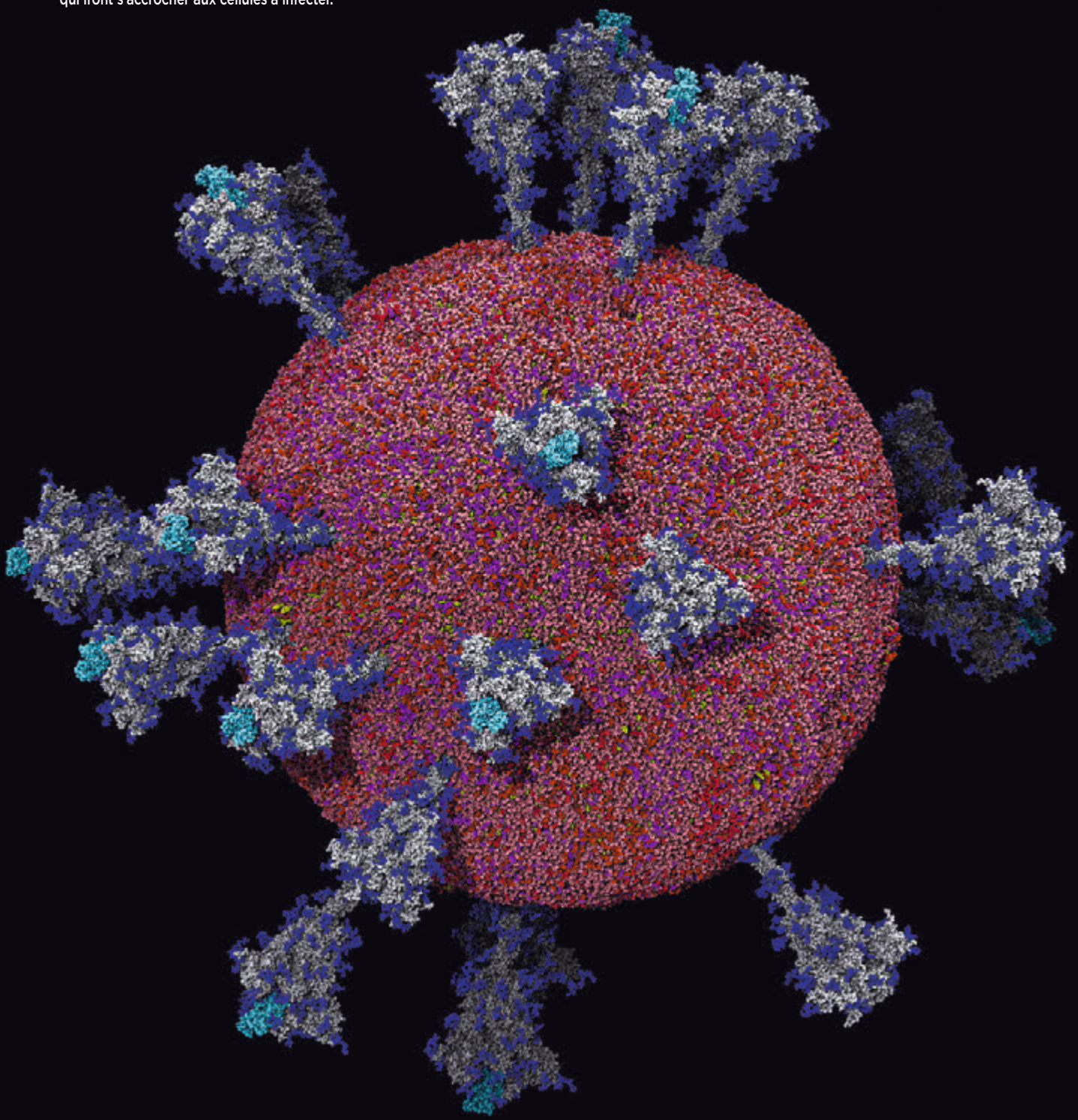


LES PROTÉINES MALIGNES CACHÉES DANS LEUR MANTEAU DE SUCRE

Trois protéines spike, accrochées à la membrane du SARS-CoV-2, en bleu clair, sont cachées et protégées par une enveloppe de sucres, en mauve (dans le rond, une vue du dessus). Elles forment les spicules caractéristiques du virus.

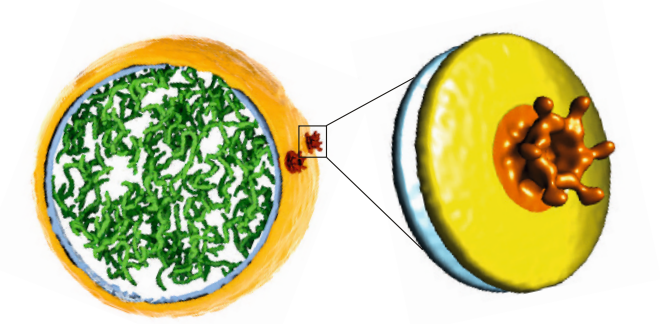
UN VIRUS BARDÉ DE PIQUES

Dans cette reconstitution informatique, atome par atome, du virus SARS-CoV-2, on distingue l'enveloppe et un ensemble de spicules, les protéines en pointes qui iront s'accrocher aux cellules à infecter.



Des pores dans les vésicules

Que le SARS-Cov-2 se multiplie dans les cellules ne surprend pas les chercheurs. En revanche, savoir où et comment il s'échappe d'une cellule pour en infecter une autre doit être précisé. C'est ainsi qu'ont été découverts des pores dévoilés par la cryo-microscopie électronique. Cette technique consiste à congeler très rapidement les échantillons biologiques dans de l'éthane liquide (–88 °C), de manière à les figer dans une glace amorphe tels qu'ils étaient au moment du prélèvement. Ensuite, en découpant ces échantillons glacés à l'aide de faisceaux d'ions focalisés, on obtient des tranches ultrafines, de 150 à 200 nanomètres d'épaisseur. En étudiant de telles tranches de cellules infectées, les équipes de Montserrat Bárcena et Eric Snijder, de l'université de Leiden, aux Pays-Bas, ont observé des pores qui traversent la double membrane (1). Les images révèlent leur structure en couronne symétrique de 30 nanomètres de diamètre.



▲ *À la surface d'une vésicule à double membrane (en jaune) où se multiplie l'ARN viral (en vert), les chercheurs ont mis en évidence des pores dont ils ont observé la structure en couronne (zoom en orange).*

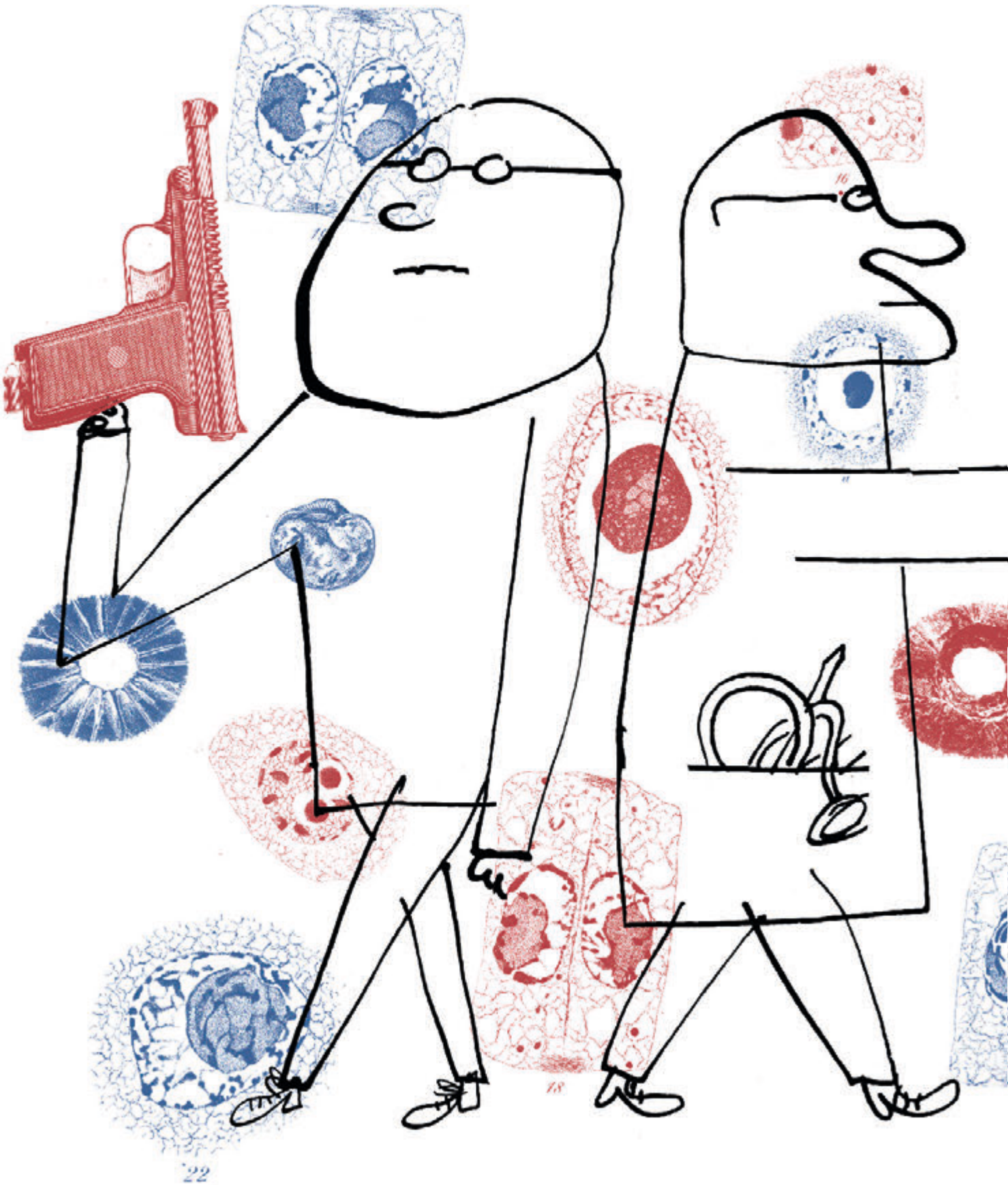
LORENZO CASALINO (IMAGE), ROMMIE AMARO, AMARO LAB, UC SAN DIEGO - MONTSERRAT BARCENA/ SECTION ELECTRON MICROSCOPY, DEPARTMENT OF CELL AND CHEMICAL BIOLOGY LEIDEN UNIVERSITY MEDICAL CENTER

Les chercheurs néerlandais ont également établi que le composant principal du pore est la protéine du virus (nsp3). *« Pour éviter les problèmes de biosécurité, nous n'avons pas utilisé le SARS-CoV-2 dans notre étude, mais le coronavirus responsable de l'hépatite murine, qui est un virus du même genre,* explique Montserrat Bárcena. *Bien que nous n'ayons pas encore de modèle 3D pour le pore du SARS-CoV-2, nous nous attendons à ce que les deux structures soient comparables. Ce sont à la fois des bêta-coronavirus et la protéine nsp3, le composant principal du complexe, est très similaire. »* La découverte de ce pore ouvre de nouvelles pistes afin d'élaborer des molécules qui empêcheraient l'ARN viral de sortir de la vésicule à double membrane. *« Cela pourrait être une stratégie, mais il reste encore beaucoup de travail pour comprendre comment cela fonctionne »,* souligne la biologiste. M. G.

(1) G. Wolff *et al., Science, 6509,* 1395, 2020.

Rommie Amaro et Arvind Ramanathan, spécialistes de chimie assistée par ordinateur respectivement à l'université de Californie à San Diego et au laboratoire national d'Argonne, près de Chicago, aux États-Unis, ont aussi exploré le mouvement du spicule du SARS-CoV-2 (3). À l'aide de supercalculateurs et d'algorithmes d'intelligence artificielle, ils ont modélisé les mouvements atome par atome des protéines spike et de l'enveloppe virale, qui ne contiennent pas moins de 305 millions d'atomes ! C'est la première fois qu'un objet biologique aussi grand est simulé. Ce travail a généré 200 téraoctets de données. Pour Rommie Amaro, ces simulations sont nécessaires à la compréhension des mécanismes de l'infection. *« Les images expérimentales de microscopie nous donnent une idée de ce à quoi ressemblent le virus et ses spicules, mais elles ne peuvent pas nous raconter toute l'histoire,* souligne-t-elle. *La seule façon est d'utiliser des simulations, et à l'heure actuelle, nous avons poussé au maximum les programmes de simulations moléculaires dont nous disposons. Nos efforts ont mis en lumière de nombreux aspects de la dynamique et de la fonction des spicules par rapport à la protéine ACE2. Nous avons montré que cette protéine, qui sert de récepteur à une partie du spicule, est aussi flexible dans sa partie qui la relie à la membrane cellulaire. Nous pensons que cette flexibilité contribue à former des complexes productifs avec la protéine spike et peut servir de source d'énergie mécanique utile au processus de fusion entre le virus et la cellule. »* On ne peut que saluer l'effort colossal mondial en imagerie microscopique qui aide les virologues à lever le voile sur les mécanismes d'infection et de reproduction de ce virus. ■ **Mathias Germain**

(1) M. Cortese *et al., Cell Host & Microbe, 6,* 853, 2020.
(2) B. Turonova *et al., Science, 370,* 203, 2020.
(3) L. Casalino *et al.,* bioRxiv, doi:10.1101/2020.11.19.390187, 2020.



Les Français et la science : une crise de confiance ?

Malgré la crise sanitaire actuelle, malgré les affaires du sang contaminé et de la vache folle, malgré la défiance envers les OGM ou le nucléaire, la science continue de bénéficier d'un large soutien de la part des Français. Du moins globalement. Car, si l'on regarde de plus près les sondages, son capital à dominante positive s'est converti en relative incertitude : du bien ou du mal peuvent, pour une majorité du public, résulter de l'activité scientifique. Les chercheurs et chercheuses, quant à eux, ne jouissent plus du même crédit. L'enrôlement clandestin de certains d'entre eux dans la défense de firmes privées, dans le cas du tabac ou du réchauffement climatique, a fait émerger des doutes sur la probité de la communauté.

DR

Daniel Boy
DIRECTEUR DE RECHERCHE ÉMÉRITE, FONDATION NATIONALE DES SCIENCES POLITIQUES, À PARIS
À Sciences Po, il travaille notamment sur les relations entre science, technique et société. Il fait partie d'un réseau de chercheurs analysant l'impact des biotechnologies en Europe.

La crise du coronavirus remet aujourd'hui en scène de façon dramatique la question des relations entre science et société. Beaucoup s'interrogent : les rapports entre le public et la science vont-ils avoir dramatiquement changé ? Et ce, de manière durable ? L'image des scientifiques est-elle altérée ? Ces questions ne sont pas nouvelles. Les gestionnaires de la recherche scientifique les prennent en compte avec attention depuis bien longtemps. En 1971, le rapport de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) sur les politiques de la science, rédigé par le physicien américain Harvey Brooks, pionnier de l'intégration de la science dans les politiques publiques, témoignait ainsi de ces inquiétudes (1). On y lit par exemple : *« Il y a de nos jours une sorte de réaction passionnelle à l'égard de la science et de la technologie. On se rend compte que si science et technique ont procuré à la société d'immenses avantages, il en a également résulté pour celle-ci certains désavantages. Il faudra donc qu'au cours des dix années à venir, les politiques intéressant la science et la technologie prennent en compte les avantages et les inconvénients tant réels que potentiels qui peuvent découler de l'application de la science ou de la mise en œuvre de la technologie. »* Pendant les années 1990, c'est une série d'affaires – le sang contaminé, la vache folle, les OGM – qui ont concrétisé la notion de crise scientifique et mis au premier plan la problématique du risque technoscientifique. Aujourd'hui, c'est la crise du Covid-19 qui les replace au premier plan.

En France, les changements de valeurs de la société ont été mis en évidence grâce à sept enquêtes par sondages de 1972 à 2011 (2). Centrées sur les représentations sociales de la science et de la technique, administrées en « face-à-face » sur des échantillons représentatifs de la population française, selon la méthode des quotas *[l'auteur a participé à la définition et à l'analyse de ces enquêtes réalisées en 1972, 1982, 1989, 1994, 2000, 2007 et 2011, NDLR]*, elles ont toutes été financées par le ministère de la Recherche. Cette précieuse base de données permet de décrire le « socle historique » des attitudes du public à l'égard de la science. Sans revenir en détail sur l'ensemble des questions posées dans cette période, il est en effet possible de définir deux dimensions fondamentales qui constituent pour nous la base des représentations sociales de la science et de la technique. La première relève de l'image sociale des chercheurs scientifiques ; la seconde concerne la confiance dans la science et l'évaluation de son bilan global.

LA PERSISTANCE D'UN MYTHE

L'image des chercheurs *« dévoués, travaillant pour le bien de l'humanité »* mobilise le souvenir scolaire des personnages historiques incarnant le mythe d'une science abstraite, détachée des intérêts matériels et toute vouée au bien public. Louis Pasteur, Marie Curie et parfois Albert Einstein (avec des réserves) constituent le panthéon de cette représentation. L'évolution des réponses à cette question dans le temps fait apparaître deux phénomènes (Question 1) : d'abord, globalement, en considérant le total des réponses positives, le mythe scientifique a assez bien résisté au temps. En 1972, 88 % des personnes interrogées acquiesçaient ainsi à cette opinion ; en 2020, 86 %. Le diagnostic se nuance si l'on considère non plus le total des opinions positives (« *Tout à fait d'accord* » et « *Plutôt d'accord* »), mais les pourcentages d'accord « sans réserve » (les seules réponses « *Tout à fait d'accord* »). De 53 % lors de la première enquête, ce pourcentage diminue dans les

(1) OCDE, « Science, croissance et société : une perspective nouvelle », 1971.

(2) Daniel Boy, « Les représentations sociales de la science », in Michel Wieviorka (dir.), *La Science en question(s)*, Ed. Sciences humaines, 2014.

(3) Sondage effectué par Ipsos pour la Fondation Nicolas Hulot pour la nature et l'homme, du 16 au 21 octobre 2020 (tinyurl.com/Fondation-Hulot-sondage)

(4) Lire par exemple François Jarrige et Thomas Le Roux, *La Contamination du monde. Une histoire des pollutions à l'âge industriel*, Seuil, 2017.

suivantes, pour ne représenter que 20 à 26 % dans les quatre derniers sondages. La statue des *« chercheurs dévoués »* s'est certes maintenue debout, mais son socle s'est quelque peu affaissé.

La seconde approche se fonde sur la confiance dans la science et sur les jugements portés sur le bilan général de l'activité scientifique (Question 2). Bien qu'elle soit aujourd'hui sérieusement mise en question, la science conserve un capital de confiance qui la place au premier rang et à distance d'autres institutions pourtant très valorisées (la police et les associations). Et cette place n'a pratiquement pas varié dans les dix dernières années, contrairement à d'autres institutions qui ont beaucoup chuté (l'administration, la justice) (3). Jusqu'au début des années 1980, l'image d'une science dispensatrice de « bien » dominait aussi les mentalités (Question 3). À partir des années 1990, c'est le caractère ambigu des retombées de la science *(« autant de bien que de mal »)* qui l'emporte, mais la réponse la plus négative *(« plus de mal que de bien »)* demeure très minoritaire. Au total, si la science n'est certainement pas devenue une valeur négative, son capital à dominante positive s'est converti en relative incertitude : du bien ou du mal peuvent, pour une majorité du public, résulter de l'activité scientifique.

LIENS ENTRE PUBLIC ET PRIVÉ

Ces dernières années, des historiens de l'environnement ont montré que le développement technologique et industriel avait eu très précocement pour conséquence des atteintes sérieuses à l'environnement et souvent engendré des mobilisations sociales notables (4). La société du risque, telle que l'a nommée le sociologue allemand Ulrich Beck, ne date pas des vingt dernières années. Mais les années 1990 ont été marquées par une série d'affaires qui ont ancré dans le public la notion de risque industriel et questionné les responsabilités de la technoscience. Pesticides, engrais, pollution de l'air, nucléaire, OGM ou lignes à haute tension sont redoutés (Question 4), et engendrent aujourd'hui des mobilisations sociales et politiques.

Le retour sur quarante ans de mesures des attitudes du public tend à valider l'idée d'une relative continuité des représentations sociales de la science et de la technique : les éléments de base de la crise étaient présents dès l'origine de ces mesures, la situation ne fait que prolonger un état de fait antérieur.

QUESTION 1 LES CHERCHEURS SCIENTIFIQUES SONT DES GENS DÉVOUÉS QUI TRAVAILLENT POUR LE BIEN DE L'HUMANITÉ ?

Au total : 100 %

	1972	1982	1989	1994	2000	2007	2011	2018	2020
TOUT À FAIT D'ACCORD	53	40	44	34	33	26	22	20	26
PLUTÔT D'ACCORD	35	42	39	50	54	57	59	60	60
TOTAL : D'ACCORD	**88**	**82**	**83**	**84**	**87**	**83**	**81**	**80**	**86**
PLUTÔT PAS D'ACCORD	7	11	12	12	9	10	14	12	12
PAS D'ACCORD DU TOUT	3	3	3	2	2	3	2	3	2
TOTAL : PAS D'ACCORD	**10**	**14**	**15**	**14**	**11**	**13**	**16**	**15**	**14**
SANS OPINION	2	4	2	2	2	4	3	5	0

QUESTION 2 AVEZ-VOUS TRÈS CONFIANCE, PLUTÔT CONFIANCE, PLUTÔT PAS CONFIANCE OU PAS DU TOUT DANS… ?

TOTAL « TRÈS CONFIANCE » ET « PLUTÔT CONFIANCE », EN %	2011	2020
La science	87	**90**
La police	70	**74**
Les associations	80	**73**
L'administration	66	**49**
La justice	58	**48**
Les agences gouvernementales qui contrôlent les risques liés à la santé et à l'environnement	48	**44**
Les grandes entreprises	47	**42**
L'Assemblée nationale	38	**35**
Le gouvernement	27	**33**
Les médias	29	**26**

QUESTION 3 D'UNE MANIÈRE GÉNÉRALE, AVEZ-VOUS L'IMPRESSION QUE LA SCIENCE APPORTE À L'HOMME PLUS DE BIEN QUE DE MAL, PLUS DE MAL QUE DE BIEN OU À PEU PRÈS AUTANT DE BIEN QUE DE MAL ?

Au total : 100 %

	1972	1982	1989	1994	2000	2007	2011	2018
PLUS DE BIEN QUE DE MAL	56	47	41	37	45	44	41	39
PLUS DE MAL QUE DE BIEN	5	6	4	6	3	6	6	12
À PEU PRÈS AUTANT DE BIEN QUE DE MAL	38	44	52	56	51	48	52	47
SANS OPINION	1	3	3	1	1	2	1	2

Pourtant, certains éléments donnent à penser qu'il y a aujourd'hui, au cœur de la crise scientifique, des éléments qui en renouvellent partiellement la problématique. Le modèle initial de ce que nous avons nommé le « mythe scientifique » se fondait selon nous sur une vision symbolique de l'univers de la science exemplifié par l'image des « savants ». Le mythe de la science exigeait, pour être rassurant, que le savoir, source potentielle de pouvoir, soit mis à l'écart des tentations du siècle, comme si les scientifiques exerçaient une sorte de sacerdoce, par définition désintéressé. Or, aujourd'hui, l'institution scientifique semble évoluer selon de nouveaux modèles : développement de multiples liens entre laboratoires publics et industries privées, mobilité des chercheurs eux-mêmes entre ces deux univers, incitation à faire des profits à travers la prise de brevets rémunérateurs…

La dilution de la frontière public/privé rend ainsi problématique le maintien du paradigme du désintéressement des chercheurs. Un indicateur concret de ces changements peut être considéré : en 1995, 45 % des chercheurs scientifiques relevaient du secteur privé, contre 61 % en 2017 (5). Or les crises scientifiques que nous avons mentionnées plus haut ont toutes, à tort ou à raison, été interprétées par le public comme un effet pervers de la supposée privatisation ou libéralisation de la science. Dans l'affaire du sang contaminé, on soupçonne que le retard mis à prendre les bonnes mesures a pu être déterminé par le désir de faire des profits avec des tests de détection français plutôt qu'américains. Du cas de la vache folle, il ressort, selon les médias, que c'est par souci d'économie que l'on a abandonné le traitement habituel des farines animales, permettant ainsi au prion, protéine infectieuse dont on ignorait l'existence, de se développer et de contaminer la chaîne animale. Enfin, cas exemplaire des méfaits supposés de la mondialisation sur l'innovation scientifique, les plantes génétiquement modifiées ne semblent trouver leurs raisons d'être que dans l'augmentation du chiffre d'affaires de compagnies privées, de surcroît américaines.

On voit donc ces dernières années émerger un référentiel d'interprétation de l'innovation scientifique qui, d'un modèle censé protéger l'intérêt public, semble désormais évoluer vers un système destiné à servir les intérêts privés d'une mondialisation honnie par les Français. L'enrôlement clandestin de scientifiques dans la défense de firmes privées, dans le cas du tabac, du réchauffement climatique ou d'autres causes controversées, dévoilé par des historiens, concrétise une grave mise en cause de la probité de la science (6). Aujourd'hui, dans chaque nouveau conflit autour d'innovations sociotechniques, la question des liens d'intérêts, voire des conflits d'intérêts, entre les scientifiques qui prennent part au débat et les firmes privées parties prenantes constitue un point crucial.

De plus, il est probable que, dans le cas français, le soupçon d'une science altérée par les valeurs du néolibéralisme et de la mondialisation détériore, plus qu'ailleurs, la confiance dans l'institution scientifique. Nombre d'enquêtes montrent en effet que les Français craignent les conséquences de la mondialisation et souhaitent que la France s'en protège. Ainsi, selon le baromètre de la confiance du Cevipof, 38 % des personnes interrogées estiment qu'*« il faut se protéger davantage du monde d'aujourd'hui »* (contre 23 % pour *« Il faut s'ouvrir davantage au monde d'aujourd'hui »*) (7). Serait-ce le sentiment de vulnérabilité de la France dans ce processus qui explique que, comparées à celles d'autres pays, les attitudes des Français quant aux conséquences du développement scientifique sont nettement plus pessimistes ? C'est ce que suggère une récente

(5) Observatoire des sciences et techniques et « L'état de l'emploi scientifique en France », rapport 2020 du ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.

(6) Erik M. Conway, Naomi Oreskes, *Les Marchands de doute,* Le Pommier, 2014.

(7) Cevipof, baromètre de la confiance politique, vague 10, tinyurl.com/Cevipof-barometre-vague-10.

(8) Pew Research. Center, tinyurl.com/Pew-Center-high-esteem, 2020.

enquête internationale (8), qui montre que la France se situe au dernier rang des pays considérés quant aux jugements sur les conséquences, positives ou non, des développements scientifiques (Question 5).

L'ÉPREUVE DU COVID-19

La situation vécue par le public depuis les débuts de la pandémie de Covid-19 met à nouveau en question les statuts de confiance dans la science et les scientifiques. Deux hypothèses pouvaient être formulées : soit, compte tenu du danger parfaitement ressenti, on assistait à un « ralliement » aux valeurs et aux pratiques de la science, supposées protéger par leur efficacité la santé de chacun, c'est-à-dire à un renforcement de la confiance ; soit la relative confusion observable (controverse sur l'hydroxychloroquine, déclarations contradictoires sur le port du masque, sur l'efficacité des dépistages, etc.) conduisait au contraire à un désarroi et à une baisse de la confiance dans l'institution scientifique. C'est à dessein que nous distinguons ici « la science » des « scientifiques », car il se peut que cette distinction, toujours significative, prenne une plus grande importance dans le contexte actuel.

Nous l'avons vu : en octobre 2020, la science continue à engendrer un capital de confiance supérieur à celui d'autres institutions. Mais c'est moins ce type de comparaison qui importe ici que l'évaluation de la dynamique de cette confiance dans le temps de la pandémie. Dans le même sondage, la question *« Vous diriez qu'aujourd'hui, compte tenu de l'état de la science sur le coronavirus, vous avez plus confiance dans la science qu'auparavant, ni plus ni moins confiance dans la science qu'auparavant, moins confiance ? »* a donc été posée pour tenter une évaluation de cette dynamique. Le bilan de la confiance dans la science mis dans le contexte du Covid-19 fait apparaître une règle majoritaire (69 %) de stabilité *(« Ni plus ni moins confiance dans la science qu'auparavant »)* mais aussi un léger déficit, puisqu'avec 18 %, la réponse *« moins confiance »* dépasse, de peu, la réponse *« plus confiance »* (13 %). Ces indicateurs permettent donc de conclure que la science, même dans cette période de mise en question, demeure une valeur et une institution reposant sur une solide base de confiance.

Quant aux scientifiques, les indicateurs dont on dispose ici dépeignent une image plus ambiguë. La question de la division ou de l'unanimité des

QUESTION 4 VOICI UNE LISTE DE CHOSES, POUR CHACUNE D'ENTRE ELLES, VOULEZ-VOUS ME DIRE SI, À VOTRE AVIS ELLE REPRÉSENTE POUR LA SANTÉ UN RISQUE TRÈS GRAND, ASSEZ GRAND, PAS TRÈS GRAND OU PAS GRAND DU TOUT ?

Au total : 100 %	TRÈS GRAND	ASSEZ GRAND	**TOTAL GRAND**	PAS TRÈS GRAND	PAS GRAND DU TOUT	**TOTAL PAS GRAND**	SANS OPINION
Les pesticides utilisés pour la production de plantes	58	36	**94**	4	1	**5**	1
Les excédents d'engrais qui passent dans les réserves d'eau en sous-sol	58	34	**92**	5	1	**6**	2
La pollution de l'air créée par les voitures	41	51	**92**	8	0	**8**	0
Le voisinage des centrales nucléaires	47	33	**80**	15	2	**17**	3
Les aliments génétiquement modifiés	42	34	**76**	14	2	**16**	8
Le voisinage d'une ligne à haute tension	24	41	**65**	23	5	**28**	7

Enquête Science 2011

QUESTION 5 EN GÉNÉRAL, DIRIEZ-VOUS QUE LES DÉVELOPPEMENTS SCIENTIFIQUES ONT EU UN EFFET PLUTÔT POSITIF SUR LA SOCIÉTÉ, UN EFFET PLUTÔT NÉGATIF, OU UN EFFET AUSSI POSITIF QUE NÉGATIF ?

	UN EFFET PLUTÔT POSITIF	UN EFFET PLUTÔT NÉGATIF	UN EFFET AUSSI POSITIF QUE NÉGATIF	SANS OPINION
Suède	65	2	31	1
Espagne	64	3	30	10
Japon	58	3	37	2
République tchèque	55	6	37	2
Corée du Sud	55	7	36	2
Australie	54	3	41	2
Pologne	53	11	31	12
Singapour	52	5	36	4
Taïwan	52	4	42	1
Inde	51	11	26	2
Canada	50	4	44	1
Russie	49	3	43	6
Royaume-Uni	48	5	44	5
Pays-Bas	47	7	44	7
Allemagne	44	9	46	2
Italie	44	5	47	3
États-Unis	41	5	53	2
Malaisie	37	11	50	2
France	30	7	61	3
Brésil	25	16	49	1

QUESTION 6 DIRIEZ-VOUS QUE VOUS AVEZ PLUTÔT CONFIANCE OU PLUTÔT PAS CONFIANCE DANS LES SCIENTIFIQUES POUR DIRE LA VÉRITÉ SUR LES RÉSULTATS ET LES CONSÉQUENCES DE LEURS TRAVAUX… ?

RÉPONSE « PLUTÔT CONFIANCE », PAR DOMAINE	Mai 2020	Octobre 2020
Les énergies nouvelles	72	76
Les nanotechnologies	60	61
Le changement climatique	59	57
L'intelligence artificielle	51	56
Le nucléaire	43	50
Les réseaux de téléphonie mobile 5G	-	49
Le coronavirus	53	39
Les OGM	37	35
Les pesticides	-	33

scientifiques sur une question sensible est un premier indice intéressant de l'image qu'ils renvoient dans le public. Sur bien des points, ils ont laissé apparaître des désaccords, parfois violents, opposant entre elles des personnalités reconnues. La question de l'usage et de l'efficacité de l'hydroxychloroquine a constitué l'un des symptômes les plus apparents de cette division. Au-delà de la question de la valeur thérapeutique de cette substance, la controverse a opposé, selon les propos de Didier Raoult, une éthique de la recherche à une éthique des soins. Le choix entre ces deux conceptions a été proposé à travers la question *« De laquelle de ces deux opinions vous sentez-vous le plus proche ? »* : *« Les médecins devraient attendre les résultats des essais scientifiques avant d'administrer les médicaments susceptibles de combattre le virus »* ou *« Les médecins doivent pouvoir prescrire des médicaments susceptibles de combattre le virus même si leur efficacité n'a pas été prouvée scientifiquement »*. Le public est très divisé : 57 % pour la première opinion, 42 % pour la seconde (et 1 % sans réponse) (9). Cela renvoie à des attachements partisans puisque l'option en faveur de la liberté de prescription et donc, de fait, à l'appui des revendications de Didier Raoult est plus fréquente parmi les personnes se situant *« très à gauche »* et *« très à droite »* sur une échelle de positionnement politique.

Deuxième indicateur de la perception des scientifiques dans la crise du Covid, la question de leur probité : *« À propos du Covid, on entend parfois dire que les scientifiques sont en désaccord. De laquelle des propositions suivantes vous sentez-vous le plus proche lorsque vous pensez à ce qui se passe en ce moment en France ? Aujourd'hui, si les scientifiques ne sont pas tous d'accord entre eux… »* Plutôt que d'opter pour la proposition selon laquelle *« c'est parce que la recherche ne permet pas encore de trancher »* (51 % des sondés), la moitié des personnes interrogées environ (49 %) soupçonnent des motivations intéressées de la part des scientifiques *(« C'est parce que certains défendent des intérêts financiers privés »)*. Moins répandue parmi les personnes dotées de diplômes universitaires scientifiques (38 %), cette opinion est en revanche plus fréquente parmi les répondants se situant *« très à droite »* (58 %) ou *« ni à droite ni à gauche »* (57 %). Un autre indicateur vient confirmer une méfiance croissante à l'égard de la parole des scientifiques (10). De mai à octobre 2020, dans la période de pandémie, le degré de confiance dans les scientifiques pour *« dire la vérité sur les résultats et les conséquences de leurs travaux »* en ce qui concerne le coronavirus a perdu 14 points de pourcentage (de 53 % à 39 %) alors que, dans d'autres domaines de recherche (les énergies nouvelles, les nanotechnologies, le changement climatique), la stabilité est le plus souvent la règle (Question 6). Très vraisemblablement, les incohérences de la parole scientifique relayée (ou parfois recherchée) par les médias ont contribué à miner la confiance du public.

Cet examen des relations entre science et public à travers quelques données d'opinion nous semble aboutir à deux conclusions majeures. D'abord, la science, en tant que valeur sociale, conserve un potentiel de confiance très appréciable, et peu sensible au contexte contemporain marqué par des crises sociotechniques. L'image des scientifiques, en revanche, est plus directement affectée par la réalité concrète des controverses. Dans la situation actuelle de crise sanitaire, l'urgence d'agir l'emporte souvent sur l'attente de conclusions scientifiques assurées, mais longues à produire. Ces contraintes entraînent inévitablement une communication scientifique souvent chaotique, qui nuit à l'image des chercheurs. Pour prendre la mesure des effets à long terme de cette situation sur l'image de la science et des scientifiques, il faudra attendre un nouveau bilan dans une conjoncture sanitaire apaisée. ■

Illustrations : Serge Bloch pour *La Recherche*

(9) Question posée dans le baromètre Covid-19, vague 7, enquête administrée en ligne par Ipsos entre le 26 et le 31 mai 2020.

(10) Sondage effectué par Ipsos pour la Fondation Nicolas Hulot pour la nature et l'homme, du 16 au 21 octobre 2020 (tinyurl.com/Fondation-Hulot-sondage) ; Question posée dans le baromètre Covid-19, vague 7, enquête administrée en ligne par Ipsos entre le 26 et le 31 mai 2020.

Votre salle de bains
peut être dangereuse...

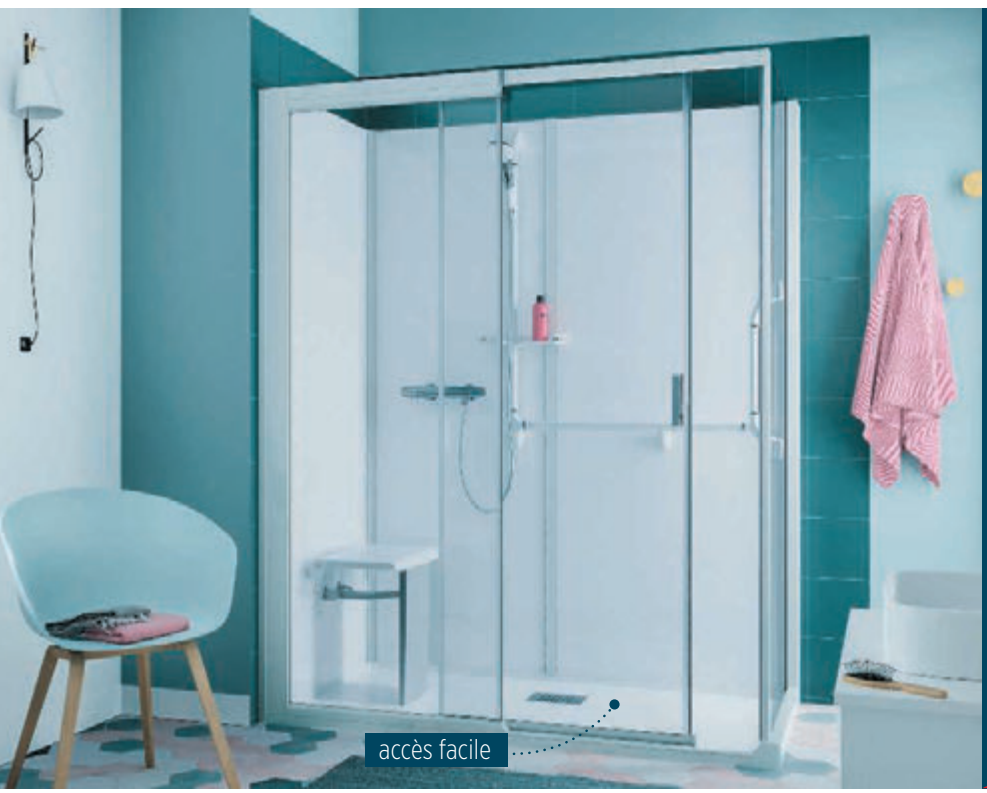
Kinemagic

UN PRODUIT KINEDO

remplace votre baignoire par une douche à l'italienne

en 48H **pour 0€*** **avec l'aide de ActionLogement**

*sous réserve d'éligibilité et selon modèle



Évitez les chutes avec
une douche
facile d'accès,
design et luxueuse.
Un produit français

Kinedo

VU À LA TV

Fabrication française

PLUS D'INFORMATIONS

par téléphone
0 800 05 06 07 Service & appel gratuits

par internet
www.kinemagic.fr

par courrier
en retournant la demande de devis personnalisé et gratuit
Coupon à envoyer à :
AQUAPRODUCTION
LIBRE RÉPONSE 51045
44680 SAINTE PAZANNE

PROFITEZ DU PLAN NATIONAL « salle de bains » JUSQU'À 5000€ D'AIDE

❑ Oui, je souhaite en savoir plus sur la douche Kinemagic et bénéficier d'un **DEVIS GRATUIT** sans engagement de ma part.

Nom : ..... Prénom : .....

Adresse : .....

.....

CP : ..... Ville : .....

Téléphone : .....

Email : .....

N'affranchissez pas ce courrier, nous vous offrons les frais postaux.

Kinemagic - La Recherche

Les réseaux neuronaux de la parentalité

Le comportement parental est piloté par une population spécifique de neurones, que l'on trouve chez la souris aussi bien dans le cerveau des mâles que celui des femelles, et dont le fonctionnement a pu être précisé. Ce rôle essentiel, que certains interprètent comme le premier exemple de comportement altruiste ayant émergé dans le cerveau animal, vaut-il pour les humains ? C'est l'interrogation fascinante que soulèvent les travaux de longue haleine menés par Catherine Dulac et son équipe, aux États-Unis. Des recherches qui ont débuté par l'étude des phéromones et du système voméronasal, qui jouent un rôle dans le comportement des deux sexes.

KRIS SNIBBE/HARVARD - MARTIN PARR / MAGNUM PHOTOS

Catherine Dulac
PROFESSEURE DE BIOLOGIE MOLÉCULAIRE ET DE NEUROSCIENCES, UNIVERSITÉ HARVARD
***Également chercheuse au Howard Hughes Medical Institute, elle s'est vu décerner le Breakthrough Prize en 2020 pour avoir* « démontré que les circuits neuronaux régissant les comportements parentaux spécifiques des mâles et des femelles sont présents chez les deux sexes ».**

La vie est pleine de surprises et je ne m'attendais pas à recevoir ce prix *[le Breakthrough Prize 2020, NDLR]*, qui a jeté une lumière inattendue sur nos travaux. Il est vrai que les résultats obtenus ces dernières années avec mes étudiants, postdocs et collaborateurs ont donné un coup de pied dans la fourmilière des études du comportement social. Au départ, nos travaux concernaient le système voméronasal, ce second système olfactif présent chez les rongeurs et la plupart des mammifères terrestres, mais perdu chez les humains et les grands singes, qui permet aux individus d'une espèce de se reconnaître entre eux. À notre grande surprise, et contrairement aux idées jusqu'alors établies sur la différenciation mâle et femelle du cerveau, nous avons découvert il y a plusieurs années, grâce à la manipulation génétique de l'organe voméronasal, que les circuits neuronaux qui régissent le comportement sexué des mâles et des femelles chez la souris existent dans le cerveau des deux sexes. Ces résultats nous ont poussés à étudier le comportement parental, qui est le plus souvent considéré comme spécifique des femelles chez les mammifères. Et en effet, nous avons mis en évidence que les circuits neuronaux régissant les comportements parentaux chez la souris étaient présents chez les deux sexes. Cela a constitué un grand pas en avant, ouvrant la voie à des aspects plus mécanistiques : nous sommes alors parvenus à expliquer au niveau cellulaire, moléculaire et de la connectivité neuronale, comment ce comportement social particulier était contrôlé. Jamais auparavant ces aspects n'avaient été compris pour aucun type de comportement.

De manière peut-être paradoxale, mon approche et mes travaux ont été fortement marqués par ma thèse en biologie du développement. Les questions que je posais à l'époque et que ma directrice de thèse Nicole Le Douarin posait dans son laboratoire sont toujours, d'une certaine façon, les questions qui continuent à m'inspirer, quoique dans un domaine tout à fait différent. De manière générale, la biologie du développement étudie les processus par lesquels les organismes croissent et se développent. En particulier, l'une des questions principales que nous formulions était, sur le modèle expérimental de la crête neurale (*), d'essayer de comprendre le rôle respectif de l'information génétique – l'information préprogrammée – et des facteurs environnementaux pour le développement embryonnaire. C'est une problématique similaire que je poursuis depuis des années dans mon laboratoire à l'université Harvard, mais cette fois pour étudier le cerveau et les circuits neuronaux du comportement social.

LE RÔLE DE L'INFORMATION GÉNÉTIQUE

Ma thématique consiste à m'interroger sur l'identité des réseaux neuronaux qui commandent le comportement social d'un animal, par exemple une conduite sexuelle ou agressive. Qu'est-ce qui va diriger son agressivité vers un nouveau-né plutôt que d'adopter un comportement parental ? Quelle est la fonction des neurones qui conduit un individu à un choix précis de comportements ? Résulte-t-elle d'une information génétique préprogrammée – instinctive en quelque sorte ? Après ma thèse, je suis partie dans le laboratoire de Richard Axel, à l'université Columbia, à New York. C'est là, en travaillant sur l'organe voméronasal, que j'ai ouvert cette voie vers l'étude du comportement social.

Par définition, une phéromone est une molécule qui change le comportement social d'un individu. Dans cet esprit, il peut tout à fait s'agir d'une odeur, bien que le système voméronasal, qui a un rôle essentiel dans la détection des phéromones, évite

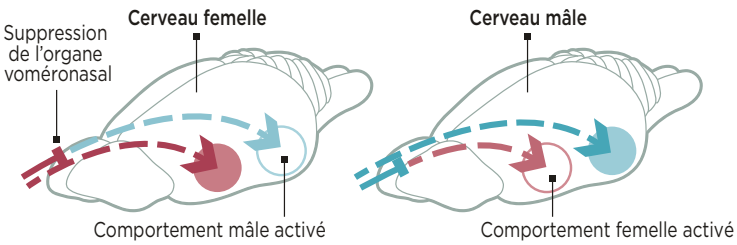
(*) **La crête neurale** est une population de cellules chez l'embryon qui donne lieu au système nerveux périphérique ainsi qu'aux cellules pigmentaires de la peau. Une bonne partie du crâne et de la mâchoire des vertébrés dérive aussi de la crête neurale.

les régions corticales du cerveau, suggérant une détection inconsciente de ces signaux chimiques. En fait, tout commence avec le système olfactif et les récepteurs aux odeurs. En 1991, Linda Buck et Richard Axel ont mis en évidence une vaste famille de gènes exprimés dans l'épithélium olfactif qui codent les récepteurs aux odeurs, ce qui leur a valu en 2004 le prix Nobel de physiologie ou médecine. Après cette découverte extraordinaire, il ne faisait aucun doute dans l'esprit des scientifiques que les récepteurs aux phéromones exprimés dans l'organe voméronasal devaient constituer une sous-famille particulière parmi les récepteurs olfactifs. Deux ans durant, je me suis fondée sur les connaissances des récepteurs olfactifs pour tenter d'identifier les récepteurs aux phéromones, mais j'essuyais échec sur échec et mon moral était au plus bas. Et puis, un jour, je me suis demandé pourquoi ne pas m'inspirer de l'approche de cellules uniques qui avait été utilisée dans mon laboratoire de thèse. Nicole Le Douarin s'était rendu compte que, pour comprendre le devenir et la diversité des cellules de la crête neurale, il était essentiel d'étudier les cellules de crête une par une, plutôt que de suivre leur différentiation en tant que population cellulaire. Cette approche est très puissante, car on parvient vraiment à comprendre de façon spécifique la contribution de programmes génétiques par rapport aux influences environnementales sur des cellules isolées d'une population cellulaire hétérogène.

Appliquer cette philosophie expérimentale au niveau moléculaire devait être payant. L'objectif : parvenir à identifier les gènes spécifiques exprimés par une cellule unique et pas par sa voisine. Si chaque neurone exprime un récepteur aux phéromones différent, comparer les gènes exprimés par un neurone unique de l'organe voméronasal par rapport à un autre devrait permettre de découvrir les récepteurs aux phéromones. Et c'est effectivement ce qui s'est passé. J'ai ainsi dévoilé chez la souris une famille de gènes très différents de ceux exprimés par les récepteurs aux odeurs dans le système olfactif principal, même si, de façon très lointaine, sur le plan évolutif, on peut trouver des similitudes. La difficulté est qu'il s'est trouvé y avoir bien plus de récepteurs aux phéromones que ce que l'on imaginait. Dans une première étape, nous avons découvert une première famille d'une vingtaine de gènes (1). Puis assez rapidement, nous avons eu à notre disposition plus de 300 gènes codant ces

DES CIRCUITS MIXTES

Le cerveau des souris des deux sexes possède les circuits neuronaux qui correspondent aux comportements mâle et femelle. Dans les deux cas, l'organe voméronasal aiguillonne les comportements. Dans le cerveau femelle, la suppression de l'organe voméronasal fait apparaître un comportement mâle, comme la copulation avec toutes les souris. À l'inverse, dans le cerveau des mâles sans organe voméronasal, un comportement typiquement femelle – le comportement maternel – émerge.



récepteurs (2). Dès lors, comment comprendre le rôle précis de ces gènes dans le comportement social ? En effet, l'organe voméronasal peut être vu comme une mosaïque de neurones différents, chacun exprimant un récepteur différent, et donc chacun se montrant sensible à un type de phéromones. Avec autant de types de récepteurs, l'idée naïve de départ consistant à manipuler génétiquement les récepteurs individuels pour en analyser les conséquences sur le comportement social des souris était sans doute vouée à l'échec. En effet, comment choisir un, deux, trois récepteurs ou plus parmi 300 ?

INVERSION DU COMPORTEMENT SEXUEL

C'est alors que nous avons eu l'idée de manipuler un gène que nous avions découvert en 1999, exprimé par tous les neurones de l'organe voméronasal, un gène baptisé TRPC2, qui code un canal ionique (*) et qui est essentiel pour son fonctionnement (3). Dès lors, nous avons pu analyser comment, en intervenant sur ce canal, on pouvait étudier le comportement.

Grâce à des souris mutantes chez lesquelles nous avions rendu ce canal déficient – donc chez lesquelles l'organe voméronasal ne fonctionnait plus –, nous avons constaté un comportement social altéré très surprenant (4). D'après toute la littérature publiée sur ce sujet, on s'attendait à ce que l'organe voméronasal déclenche le comportement reproducteur. Or, quand on plaçait un mâle mutant – sans organe fonctionnel – avec une femelle, on constatait qu'il avait un comportement

(*) **Un canal ionique** est une protéine qui se situe sur la membrane des cellules et qui permet à certains éléments d'entrer ou de sortir, rendant la cellule fonctionnelle.

BRUNO BOURGEOIS

▲ *Dans la société, l'idée d'un partage égal de l'instinct parental a déjà bien progressé.*

MARTIN PARR / MAGNUM PHOTOS

reproducteur tout à fait normal. À quoi alors pouvait bien servir l'organe voméronasal ?

Pour le savoir, nous avons étudié un autre comportement social : l'agressivité. Habituellement, lorsqu'on place deux souris mâles dans une cage, elles se battent. Dans nos expériences, nous avons placé deux mâles adultes dans la même cage, l'un étant un mutant et l'autre un animal sauvage. À notre stupéfaction, le mâle mutant n'attaquait plus l'intrus, mais essayait d'avoir un rapport sexuel avec lui. Ensuite, nous avons choisi un mutant mâle et deux animaux sauvages (un mâle et une femelle). Le mutant mâle s'est mis à copuler avec le mâle et avec la femelle avec la même fréquence. Ce comportement suggérait que le problème du mutant était qu'il ne parvenait plus à distinguer un mâle d'une femelle. De là nous est venue cette idée que l'organe voméronasal joue un rôle dans la régulation spécifique des comportements sexués.

Mais ce qui nous manquait était le comportement des femelles mutantes. Nous avons continué à travailler et avons pu aboutir à une analyse, en 2007, dont les conclusions nous ont encore plus surpris (5). Tout d'abord, nous avons mis en contact une femelle mutante, chez laquelle on avait « éteint » génétiquement l'organe voméronasal, avec l'un de ses congénères, mâle ou femelle. À notre grand étonnement, cette femelle mutante adoptait le comportement reproducteur typique d'un mâle, montant sur le dos d'autres souris et émettant des ultrasons caractéristiques du comportement copulateur des mâles. Ce comportement pouvait-il être dû au fait que cette femelle n'avait jamais eu d'organe voméronasal fonctionnel depuis sa naissance ? Elle aurait alors un défaut de comportement dû à un développement anormal de connectivités neuronales. Nous avons alors sélectionné des femelles qui avaient grandi normalement avec un organe voméronasal, puis nous le leur avons ôté chirurgicalement. Là encore, ces femelles qui avaient subi cette ablation à l'âge adulte se comportaient comme des mâles.

Ces observations contredisaient complètement ce que l'on savait sur la régulation des comportements mâle et femelle. Jusqu'alors, il était établi que les hormones sexuelles délivrées à la naissance permettaient l'établissement de circuits mâles dans le cerveau mâle et de circuits femelles dans le cerveau femelle. Or là, nous voyions une femelle adulte capable du comportement sexuel d'un mâle. Comment l'interpréter ? Notre hypothèse est que le cerveau femelle possède en fait deux circuits neuronaux : celui du comportement femelle, mais aussi celui du comportement mâle. Le rôle de l'organe voméronasal serait d'assurer qu'une femelle se comporte bien comme une femelle, de manière habituelle. Mais de temps à autre, un besoin de comportement mâle se fait ressentir. Ainsi, certains chiens femelles sautent sur un autre chien, mimant un rapport sexuel, afin d'établir une domination. Ce comportement, sexuel chez un mâle, peut être utilisé à d'autres fins chez une femelle, comme ce comportement dominateur.

Notre résultat a fait beaucoup réagir. Certains endocrinologues se sont opposés à notre interprétation, arguant que le comportement de genre était fixé de façon irréversible au cours de la croissance par les hormones sexuelles, comme les androgènes (testostérone notamment) et les œstrogènes qui contrôlent le développement de circuits sexués dans le cerveau. Pour nous, les hormones ont certes un rôle essentiel pour l'expression des comportements sexués, mais, dans une mesure insoupçonnée jusqu'ici, les circuits sexués mâles et femelles existent dans le cerveau des deux genres, et normalement, l'un d'entre eux est activé majoritairement selon le sexe de l'individu.

CIRCUITS DE COMPORTEMENT SILENCIEUX

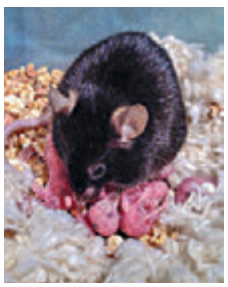
C'est là qu'entre en jeu le comportement parental. Car s'il est un comportement typiquement femelle dans l'évolution des mammifères, c'est bien l'instinct maternel. Chez les mammifères, la mère investit massivement ses ressources énergétiques afin d'assurer le développement du fœtus in utero lors de la gestation, et ensuite lors de l'allaitement du nouveau-né. Il est donc essentiel qu'elle préserve ce sacrifice personnel en protégeant ses petits grâce à son comportement maternel. À l'inverse, cet investissement de ressources n'existe pas chez les mâles. Et en effet, chez un grand nombre d'espèces de mammifères, y compris chez les souris, les mâles négligent ou attaquent les nouveau-nés. Une façon évidente de confirmer ou d'infirmer notre hypothèse de la dualité des réseaux neuronaux régissant les comportements sexués était de vérifier si, oui ou non, un mâle sans organe voméronasal était capable de manifester un comportement de type maternel plutôt qu'agressif, comme c'est le cas normalement chez les souris mâles. Nous avions tous les outils en main, il ne restait plus qu'à faire les expériences que nous avons décrites dans un article de 2014 paru dans la revue *Nature* (6).

La première expérience que nous avons mise en œuvre consiste à placer une souris mâle qui n'a plus d'organe voméronasal (éteint génétiquement) en présence de nouveau-nés. Au lieu de les tuer – ce que fait habituellement un mâle qui n'est pas père –, nous avons observé que ce mutant construisait un nid, amenait les petits dans le nid et s'établissait autour d'eux pour les protéger. Nous avions notre réponse : le système voméronasal commande la spécificité du comportement mâle ou femelle.

Mais pourquoi le cerveau dispose-t-il de ces attributs, à la fois mâles et femelles ? Deux réponses sont possibles. La réponse évolutive ou développementale d'une part, et la réponse sur la plasticité comportementale d'autre part. D'un point de vue développemental, il est plus facile de former un cerveau très semblable entre mâle et femelle, et d'établir des points de contrôle – l'organe voméronasal chez les souris –, plutôt que de construire des circuits très spécifiques qui n'existent que chez le mâle ou que chez la femelle. Du point de vue de la plasticité comportementale, un mâle qui n'est normalement pas parental peut se retrouver, après qu'il a copulé avec une femelle, à s'occuper de ses petits. Le fait de devenir père renverse le comportement du mâle, qui passe d'infanticidaire à paternel. Cette plasticité est permise par le fait que le cerveau mâle a des circuits de comportement parental normalement silencieux, mais qui peuvent, dans des circonstances particulières, être utilisés.

Puisque l'organe voméronasal n'existe plus chez l'humain, qu'est-ce que cela a à voir avec nous ?

Si l'on étend cette observation aux autres rongeurs, et même à d'autres vertébrés, on note que chez certaines espèces, seule la femelle est parentale, alors que, dans d'autres, le mâle et la femelle le sont. Mais on peut parier que, dans toutes ces espèces, les circuits parentaux existent chez les mâles et chez les femelles, et qu'il y a une information propre à une espèce qui fait que seule la femelle utilise ces circuits ou qu'à la fois le mâle et la femelle les utilisent. Bien sûr, la question clé est : à quel point ces observations sur les souris peuvent-elles nous apprendre des choses sur le comportement humain, et en particulier sur l'instinct maternel ? Dans la mesure où l'organe voméronasal n'existe plus chez l'être humain ni chez les grands singes, qu'est-ce que cela a à voir avec nous ? Dans le contrôle des comportements, deux aspects sont à prendre en compte : l'aspect périphérique – qu'est-ce qui déclenche le comportement – et l'aspect central – quels sont les circuits neuronaux qui entrent en



▲ *Une fois privée d'organe voméronasal, la souris mâle prend soin des nouveau-nés, comme le ferait une femelle.*

jeu. Les signaux périphériques varient beaucoup d'une espèce à une autre : pour une souris, il s'agira de phéromones particulières ; pour un oiseau, d'un signal visuel ou auditif. Cela paraît naturel : une espèce a besoin de reconnaître uniquement les signaux distinctifs de ses congénères. En revanche, on s'attend à de grandes similitudes dans les circuits centraux qui interviennent dans le comportement reproducteur, ou dans le comportement parental, parce que ces comportements sont extrêmement semblables à travers les espèces. Ces circuits centraux doivent être bien conservés, mais où pourraient-ils être situés, et quelle est l'identité précise des neurones qui les composent ?

C'est l'autre aspect marquant de notre article de 2014 : grâce à l'expression transitoire du facteur de transcription c-Fos (*) dans les neurones activés lors d'un comportement particulier, par exemple lors des soins parentaux d'une mère à ses nouveau-nés, nous avons mis en évidence, dans le cerveau des souris, la population neuronale spécifique qui s'anime lors du comportement parental et nous avons montré leur rôle essentiel dans ce comportement. Ces neurones expriment un peptide particulier, la galanine, mais on ignore s'il joue un rôle ou non (le peptide sert de marqueur de ces neurones). Ces neurones, qui existent en même nombre dans le cerveau mâle et le cerveau femelle, sont situés dans la zone préoptique de l'hypothalamus, région du cerveau de la taille d'une amande chez l'humain et qui est commune à tous les vertébrés. C'est une zone qui commande l'ensemble des comportements sociaux, mais aussi des fonctions homéostatiques essentielles (l'appétit, la soif, le sommeil, les comportements reproducteurs, agressifs, parentaux). Lorsqu'on détruit les neurones à galanine dans la zone préoptique du cerveau de souris femelles par des techniques génétiques, elles ne sont plus capables d'avoir un comportement parental. De même, lorsqu'on active artificiellement ces neurones par optogénétique (*) dans le cerveau de souris mâles habituellement infanticidaires, elles font preuve d'un instinct parental. Ces neurones sont donc suffisants et essentiels pour le comportement parental. Ces résultats révèlent une spécificité étonnante du contrôle du comportement parental : c'est un peu comme un bouton de commande, si vous appuyez sur le bouton, tout animal, y compris un mâle infanticidaire, une mère, un père ou une femelle vierge vont venir lécher et s'occuper de nouveau-nés placés devant eux, même si ce ne sont pas leurs propres petits. Détruisez ce bouton ou réduisez-le au silence, et tout animal, même une mère devant ses propres petits, va les ignorer !

INSTINCT ET APPRENTISSAGE

Cet effet est si saisissant que nous avons voulu aller plus loin dans la compréhension du contrôle parental : comment cette population particulière de neurones arrive-t-elle à contrôler les nombreux aspects du comportement parental, par exemple l'attirance vers les petits, les soins parentaux eux-mêmes, et enfin les aspects hormonaux et l'inhibition des interactions adultes qui caractérisent l'état parental ? Dans un travail effectué en 2018, nous avons disséqué le réseau neuronal organisé autour des neurones à galanine et démontré la fonction particulière de chaque branche du réseau (7). Ainsi, l'une des branches, qui se projette sur une aire du cerveau nommée la substance grise périaqueducale (*), se spécialise dans la régulation de l'aspect moteur du comportement parental. D'autres projections régulent les aspects de motivation, de relargage hormonal ou de contacts sociaux (voir le schéma p. 99). C'est la première fois qu'un comportement social a été disséqué en détail de la sorte, fournissant une compréhension inédite de la réaction cérébrale et comportementale d'un adulte envers des petits de son espèce.

Qu'est-ce que ces résultats impliquent pour l'instinct parental ? Lorsqu'on enlève ces neurones à galanine, le comportement parental disparaît. À l'inverse, si on les active, ils le déclenchent. Notre hypothèse est que ces neurones codent l'instinct parental chez la plupart des espèces : ils sont là, dans le cerveau, et dans les bonnes conditions – notamment après qu'une femelle détecte les signaux qui indiquent la présence de nouveau-nés –, ils déclenchent le comportement parental. Une sorte d'instinct maternel qui pousserait les mères à réagir aux pleurs de nouveau-nés, par exemple.

Bien évidemment, l'instinct ne veut pas dire que ces neurones induisent un comportement parental parfait, qu'une mère sache exactement ce qu'elle doit faire. Cela signifie qu'une femme qui entend des cris est attirée par les nouveau-nés et veut agir. Chez la souris, c'est frappant parce que, même une femelle qui n'a pas eu sa propre progéniture

(*) **C-Fos** est une protéine de transcription fréquemment synthétisée à la suite d'un signal activateur.

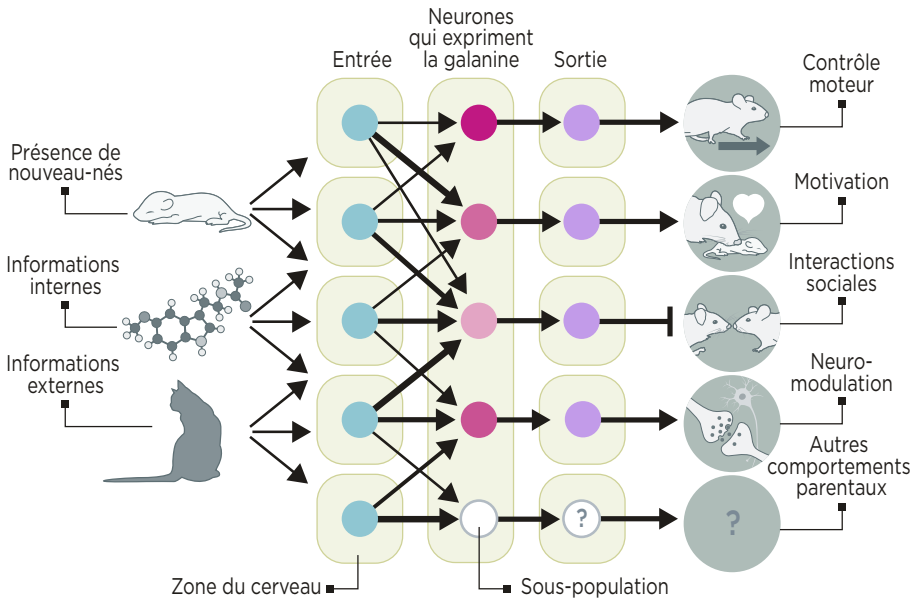
(*) **L'optogénétique** consiste à modifier génétiquement des cellules afin de les rendre réactives à la lumière. On peut alors les activer ou bloquer leur activité en les éclairant spécifiquement.

(*) **La substance grise périaqueducale** est un ensemble de neurones situé dans le mésencéphale et qui joue un rôle dans les comportements de défense.

LAB/HOWARD HUGHES MEDICAL INSTITUTE/HARVARD

CARTOGRAPHIE DU CERVEAU PARENTAL

Cette carte schématise le réseau cérébral des neurones à galanine découvert par l'équipe de Catherine Dulac. Les stimulus extérieurs (par exemple, la présence de nouveau-nés) sont captés par des zones du cerveau (entrée) qui elles-mêmes sont liées à des sous-populations de neurones à galanine. Chaque sous-population se projette vers une région spécifique du cerveau (sortie) qui induit ou supprime un comportement parental.



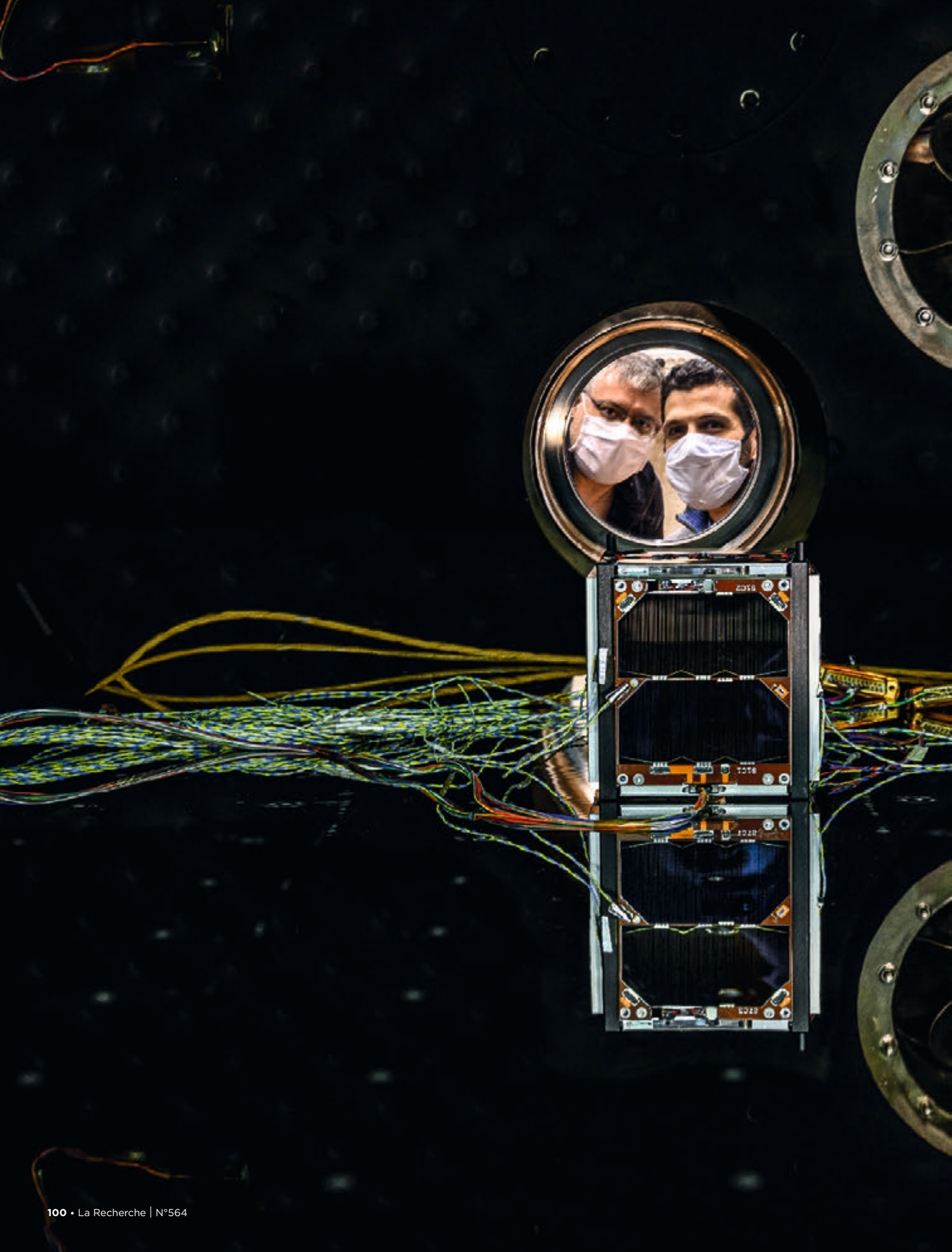
construira un nid et s'occupera des petits, pourvu qu'on active ces neurones. Toutefois, elle ne le fera pas très bien, contrairement à une femelle qui a déjà eu sa propre portée, qui a donc de l'expérience et s'occupera de ses petits de façon beaucoup plus efficace. L'instinct est essentiel, mais il ne faut pas oublier l'apprentissage.

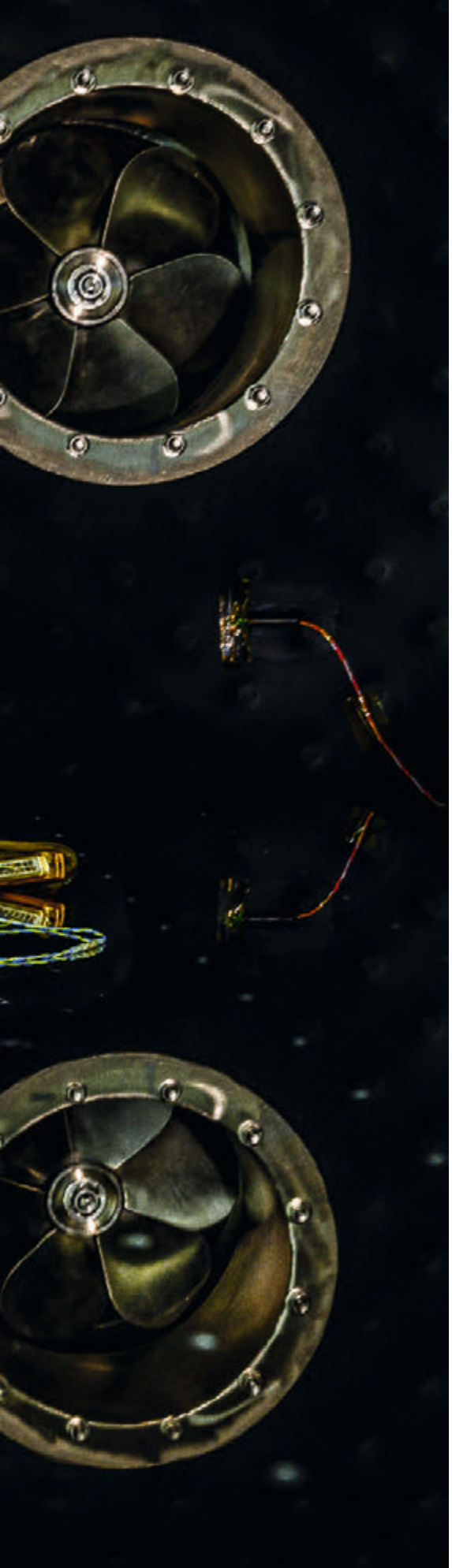
En tant qu'êtres humains, nous réfléchissons et rationalisons les situations. Bien entendu, nous savons que les nouveau-nés sont extrêmement dépendants : il faut s'en occuper, les nourrir, les protéger. Mais quid de la souris ? Face à sa progéniture – ces petites bêtes roses qui ne savent rien faire, qui crient à l'aide et qui ont besoin d'attention constante–, pourquoi voudrait-elle s'en occuper ? Une souris a peur d'être le dîner d'un chat ou d'un rat. Les animaux, dans la nature, sont sans arrêt sous la menace de prédateurs. Qu'un animal puisse s'occuper d'un autre, et risque ainsi sa propre survie, est tout à fait surprenant. Et, à mon avis, c'est le rôle de ces neurones : « dire » à une femelle, quand elle entend le cri des petits, qu'elle les sent ou qu'elle les touche, qu'il faut qu'elle s'en occupe. L'une des idées qui circulent depuis bien longtemps sur le comportement parental est qu'il s'agit du premier exemple de comportement altruiste qui a émergé dans le cerveau animal, ce qui est vraiment un concept fascinant !

Les directions ouvertes par ces travaux sont multiples. Aujourd'hui, avec mon équipe, je continue à étudier les réseaux de l'instinct parental, ces neurones à galanine, pour explorer comment fonctionne le comportement parental en temps réel, grâce à l'imagerie de l'activité neuronale. Nous étudions aussi plusieurs autres populations que nous avons découvertes et qui ne sont actives que chez la mère ou chez le père, et qui ont donc peut-être aussi des rôles très particuliers pour le comportement spécifique des parents. Nous avons aussi découvert récemment, par une approche très similaire, les neurones qui contrôlent le comportement infanticidaire chez la souris, ainsi que les signaux sensoriels spécifiques qui déclenchent ce comportement **(8)**. Enfin, si l'on parvient à bien comprendre comment le comportement parental fonctionne, peut-être pourra-t-on regarder des circuits différents dans des systèmes où l'on peut observer l'émergence d'autres types de comportement altruiste. ■

(1) C. Dulac et R. Axel, *Cell, 83,* 195, 1995.
(2) G. Herrada et C. Dulac, *Cell, 90,* 763, 1997.
(3) E. Liman *et al., PNAS, 96,* 5791, 1999.
(4) S. Stowers *et al., Science, 295,* 1493, 2002.
(5) T. Kimchi *et al., Nature, 448,* 1009, 2007.
(6) Zh. Wu *et al., Nature, 509,* 325, 2014.
(7) J. Kohl *et al., Nature, 556,* 326, 2018.
(8) A. Autry *et al.,* bioRxiv, doi:10.1101/697334, 2020 ; Y. Isogai *et al., Cell, 175,* 1827, 2018.

BRUNO BOURGEOIS





CHRISTOPHE LEPETIT

Un nanosatellite français part affiner l'étude du climat

De la taille d'un Rubik's Cube, le satellite UVSQ-SAT est le premier-né d'une nouvelle filière spatiale, conçue et montée de toutes pièces par des universitaires du CNRS, sans l'appui d'aucune agence spatiale. Un modèle de fonctionnement inédit, qui intègre une forte dimension éducative et repose sur des synergies avec des partenaires industriels. De quoi favoriser une grande réactivité pour proposer des missions scientifiques à moindre coût. Pourtant, celle de UVSQ-SAT, lancé en principe le 14 janvier 2021 depuis la base de Cap Canaveral, en Floride, est primordiale. Elle consiste à mesurer des indicateurs essentiels pour une meilleure compréhension de l'évolution du climat et donc de l'avenir de notre planète.

◀ *L'équipe du Latmos, à Guyancourt, dans les Yvelines, procède aux derniers tests en chambre de vide thermique sur le satellite UVSQ-SAT, d'un poids de 1,4 kg, avant son départ pour les États-Unis.*

Sur le campus de Guyancourt, dans les Yvelines, à mesure que passent les jours, la fébrilité croît en ce mois de décembre : le 14 janvier 2021 (à 1 heure, heure française), le satellite UVSQ-SAT devrait être mis en orbite par le lanceur privé américain Falcon 9 de SpaceX, à Cap Canaveral, en Floride. Une date à marquer d'une pierre blanche pour le Laboratoire atmosphères, milieux, observations spatiales (Latmos) qui l'a conçu, car ce satellite est le tout premier d'une nouvelle filière spatiale, uniquement élaborée par des universitaires et des chercheurs du CNRS. Nulle agence spatiale nationale ou internationale, nul ténor industriel privé aux commandes de cette mission ! Une fois posté en orbite basse, entre 450 et 600 km d'altitude, l'engin permettra de mesurer le bilan radiatif du système climatique terrestre. Cette donnée, qui compare l'énergie reçue et celle perdue par le système climatique de notre planète (sols, océans, atmosphère), est encore mal estimée, mais cruciale pour des modèles de prévisions. Fin septembre, nous nous étions rendus aux installations du Latmos pour assister aux ultimes tests du satellite avant son départ pour les États-Unis. Par le hublot de la cuve à vide de 3 000 litres, le satellite, de la taille d'un Rubik's Cube, semblait aussi petit et fragile qu'un jouet. Un « jouet » de 1,4 kg tout de même, qui venait de subir avec succès des écarts de température de – 80 °C à 80 °C, soit les conditions extrêmes que doit pouvoir supporter cet appareil en orbite terrestre.

Ce CubeSat est un standard de nanosatellite instauré en 1999 par deux universités américaines : l'université d'État polytechnique de Californie et l'université Stanford. L'objectif était alors d'ouvrir un nouveau champ de recherche spatiale aux universités, avec des engins standardisés, petits et « relativement » peu chers, qui puissent répondre ponctuellement à des questions scientifiques. Les CubeSats mesurent 10 cm de côté par unité (U) et, comme les Lego, ils peuvent s'empiler, ce pour augmenter leur puissance et leurs capacités. À ce jour, plus de 1 300 CubeSats ont déjà été lancés, dont moins d'une dizaine pour la France.

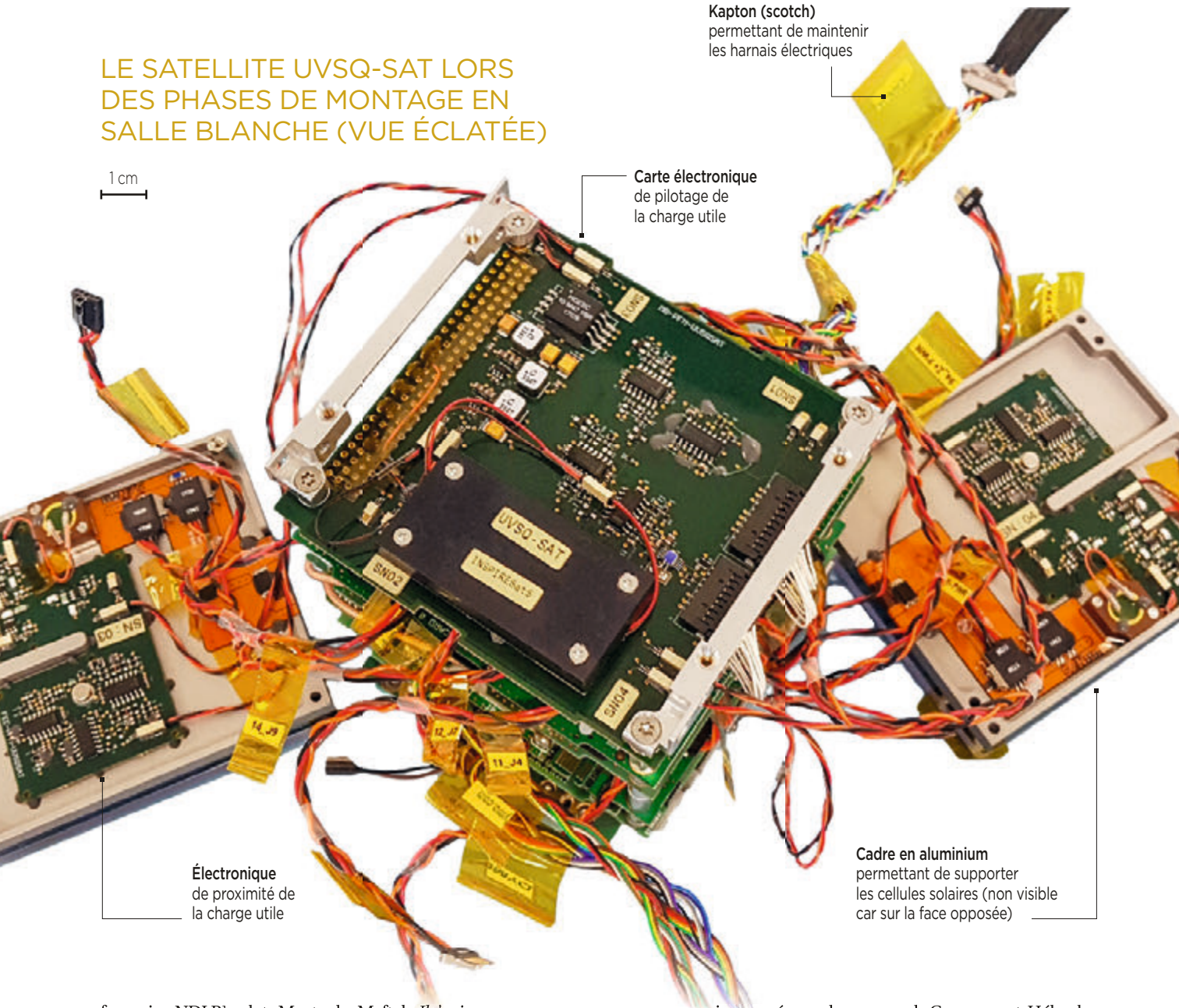
Quand, en 2017, une réunion du Committee on Space Research (Cospar, un groupe scientifique international dont le but est d'organiser les travaux scientifiques en relation avec l'exploration spatiale) se tient pendant une semaine sur l'île de Jeju, en Corée du Sud, nous avons la chance de rencontrer Philippe Keckhut et Mustapha Meftah, à l'époque respectivement directeur du Latmos et responsable scientifique de la filière petits satellites au sein du laboratoire. Les deux chercheurs de Guyancourt sont venus assister à la présentation d'une foison de projets de nanosatellites standardisés émanant d'universitaires, d'ingénieurs et d'étudiants. L'occasion pour eux de se voir confirmer l'essor spectaculaire de cette nouvelle pratique de la science spatiale, non seulement dans les universités américaines, mais aussi dans un nombre croissant de pays asiatiques. À Jeju, la plupart des projets astronomiques, climatiques ou technologiques s'articulent en effet autour de CubeSats, encore rares en France à l'époque. De quoi conforter les chercheurs français dans leur volonté de créer une filière française de CubeSats, un projet qu'ils mûrissent depuis longtemps en s'appuyant sur leurs années d'expérience.

C'est que les deux hommes ont déjà un long parcours dans l'univers des petits satellites. *« Depuis le milieu des années 1990, nous étions engagés dans le programme Myriade du Cnes* [l'agence spatiale

2,5

MILLIONS D'EUROS, c'est le prix du satellite UVSQ-SAT, dont 100 000 € pour le lancement.

LE SATELLITE UVSQ-SAT LORS DES PHASES DE MONTAGE EN SALLE BLANCHE (VUE ÉCLATÉE)

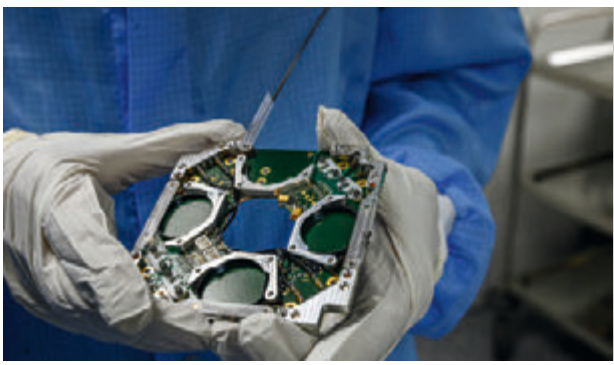


française, NDLR], relate Mustapha Meftah. *Il s'agissait de construire des programmes spatiaux plus rapides, plus efficaces et moins coûteux.* » Une initiative calquée sur le mantra *Faster, Better, Cheaper,* un mot d'ordre lancé outre-Atlantique au début des années 1990 par celui qui était alors l'administrateur de la Nasa, Daniel Goldin. Le programme de microsatellites Myriade prévoyait de lancer tous les deux à trois ans un petit satellite capable d'emporter à bas prix environ 60 kg d'instruments scientifiques. À cette occasion, des installations dédiées aux tests de la nouvelle filière ont même été inaugurées sur le campus de Guyancourt. Hélas, le résultat n'a pas été à la hauteur des attentes. « *Tout le monde y croyait,* se remémore Philippe Keckhut. *Mais cela n'a pas fonctionné. Les missions se sont révélées complexes, le problème étant que tous les microsatellites étaient différents : cela a nécessité beaucoup plus de temps et d'argent que ce qui avait été imaginé.* » Dernier exemple emblématique des difficultés de cette filière microsatellite : la mission française Taranis, dont l'échec au lancement a fait l'actualité le 17 novembre dernier. Conçue pour étudier les phénomènes qui surviennent dans la

LATMOS

très haute atmosphère lors des orages, elle a nécessité quinze ans de développement pour un budget final de… 115 millions d'euros ! Or le microsatellite a été perdu avant même d'avoir pu être mis en orbite. *« Il est question maintenant d'en refaire un second,* note Mustapha Meftah. *Mais nombre d'initiateurs de cette mission sont ou seront bientôt à la retraite… »* Le chercheur évoque aussi le cas de la mission franco-allemande Merlin de mesure du méthane, un important gaz à effet de serre dont le relâchement dans l'atmosphère pourrait s'emballer avec la fonte du pergélisol (*) arctique. Alors que la mission a été approuvée en 2015, son lancement est maintenant prévu… pour 2024 ! Soit des années d'absence de mesures et autant de manques pour établir les modèles climatiques.

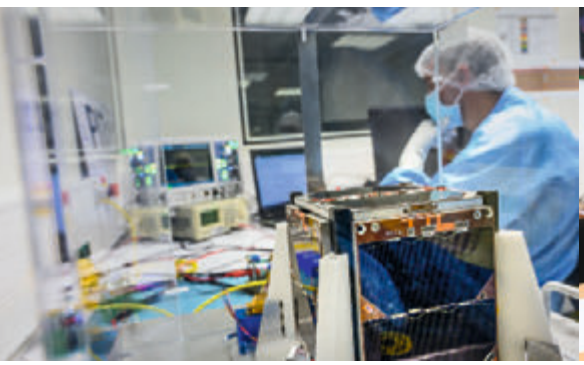
Outre la miniaturisation, les deux chercheurs ont une longue expérience dans la recherche d'un nouveau mode de fonctionnement, plus souple et plus réactif. *« À partir de 2009, nous avons également essayé de développer une forme d'autonomie en déployant un écosystème scientifique et industriel plus local,* souligne Mustapha Meftah. *Avec pour objectif de maîtriser l'ensemble des*



technologies et de les adapter aux impératifs du moment. Si une question scientifique n'est plus d'actualité, il n'est en effet pas judicieux de mener une mission obsolète à son terme. Or c'est ce que font les agences spatiales. » Les deux chercheurs ont ainsi mis au point un plan de bataille. D'abord, concevoir et miniaturiser pour produire des instruments pouvant être mis en œuvre sur la Station spatiale internationale, sur des rovers ou tout autre type de mission. *« La vision que j'avais pour le laboratoire,*

Des filières d'enseignement pour matérialiser les savoirs

Le programme Inspire intègre systématiquement une visée éducative à l'élaboration d'une mission spatiale. Les chercheurs du Latmos n'ont pas dérogé à la règle : ils ont mis en place une nouvelle filière avec l'université de Versailles (Yvelines), deuxième des universités sur la thématique des sciences de l'atmosphère au classement de Shanghai 2019. C'est ainsi que s'est ouverte, il y a deux ans, une licence professionnelle à l'IUT de Mantes-la-Jolie (mécatronique, robotique, parcours Systèmes intelligents mécatroniques pour l'industrie et le spatial). Ses étudiants participent concrètement aux productions spatiales du Latmos. *« Il est difficile de motiver des étudiants pour des programmes qui courent sur trente ans,* souligne Mustapha Meftah. *Il faut privilégier le temps court et, pour cela, les petits satellites offrent une vraie bouffée d'oxygène. »* À la rentrée universitaire 2021 s'ouvrira également un master New Space à l'université Paris-Saclay. *« Nous voulons introduire la méthode agile, qui vise à plus de flexibilité, de communication et de collaboration,* explique Mustapha Meftah. *Les CubeSats permettent de matérialiser les savoirs. Dans les écoles d'ingénieurs, c'est souvent la théorie qui est privilégiée. Il faut revenir à des systèmes plus concrets »,* dans l'esprit de La Main à la pâte, une initiative lancée en 1996 par le Prix Nobel de physique Georges Charpak, qui préconisait l'enseignement par la pratique. *« Aux États-Unis, les programmes CubeSats sont menés par une équipe experte. La possibilité d'intégrer celle-ci est offerte aux meilleurs étudiants,* explique Philippe Keckhut. *C'est une école de l'excellence, une sorte d'aspirateur de talents qui sont ensuite recrutés par le complexe industriel voisin. Nos deux filières d'enseignement devraient, elles aussi, devenir de vraies sources d'emploi si l'on en croit le retour des industriels. »* ■ S. R.



◀ *Différentes étapes du projet : à gauche, le mécanisme de déploiement des antennes ; au centre, le satellite en salle blanche ; à droite, le concepteur Mustapha Meftah montre une simulation représentant les données que la constellation de nanosatellites produira.*

CHRISTOPHE LEPETIT

c'était d'accélérer la miniaturisation », appuie Philippe Keckhut. Et c'est ainsi que l'idée des CubeSats s'est logiquement imposée à compter de 2014, d'autant que le Latmos disposait déjà, à l'époque, d'installations de tests dimensionnées pour des microsatellites. Encore fallait-il persuader des partenaires institutionnels de l'intérêt de ces appareils pour des missions scientifiques. *« Pour beaucoup, ces engins restaient de simples supports de formation pour les étudiants,* se souvient le chercheur. *Pour eux, il n'était pas question de faire de la recherche avec ça ! »* Les deux scientifiques démarchent les universités Paris-Sorbonne et Paris-Saclay, ainsi que l'École polytechnique. Sans succès. Certes, des projets de CubeSats y étaient développés, mais ils demeuraient, là encore, à destination des étudiants, sans finalité scientifique et parfois sans dimension professionnelle. *« Or, avec ces petits satellites, nous voulions faire la science que l'on ne pouvait pas faire avec les gros »*, insiste Philippe Keckhut.

COMBLER LE RETARD SUR LES AMÉRICAINS

En mai 2014, Mustapha Meftah présente son concept de nanosatellite destiné à l'étude du bilan radiatif de la Terre lors d'une conférence sur les applications spatiales, à Baltimore (États-Unis). Amal Chandran, chercheur à l'université du Colorado à Boulder, l'approche à cette occasion pour lui parler du réseau Inspire (lire l'encadré ci-contre), un programme international de développement de satellites qui réunit des universités et des agences spatiales à travers le monde. L'objectif est de former des étudiants aux techniques et sciences spatiales, tout en lançant des missions scientifiques d'avant-garde. Deux ans plus tard, Philippe Keckhut et Mustapha Meftah s'envolent pour les États-Unis. Ils visitent les installations du laboratoire de physique spatiale et atmosphérique de l'université du Colorado et ont un échange avec les chercheurs locaux au sujet de leurs programmes spatiaux. Les deux scientifiques découvrent avec intérêt l'organisation et les programmes du laboratoire américain, dont une série de missions de physique solaire. *« Il était clair qu'ils avaient pris le leadership dans ce domaine. Alors que nous avions longtemps été en tête, nous avions désormais perdu la main,* se souvient Mustapha Meftah. *Le soir, nous sommes rentrés dépités à notre petit hôtel, perdu dans la campagne américaine. Ayant mesuré l'écart qui nous séparait des Américains, nous nous sommes interrogés sur les moyens de le combler. Pour y réfléchir, nous avons enfourché les vélos de l'hôtel et, tandis que nous longions la rivière de Fourmile Creek, nous sommes tombés d'accord : il n'était plus possible d'attendre l'accord des uns et des autres, il fallait avancer vite. Ce soir-là, attablés dans un restaurant mexicain, un verre de margarita à la main, nous nous sommes rendus à l'évidence : la solution était de mettre en œuvre notre propre programme spatial, seuls, en autonomie complète ! »*

Pour prendre ce nouvel élan, le Latmos met en place une antenne et un centre de contrôle au dernier étage du laboratoire de Guyancourt afin de se connecter avec le réseau Inspire. C'est de là également que sera opéré UVSQ-SAT à partir de janvier 2021. *« Inspire, c'est aussi un réseau d'acteurs académiques et de professionnels du spatial qui partagent leur expérience, avec une vision éducative. Car nous nous sommes rendu compte qu'il fallait cesser*

(*) **Le pergélisol** (ou permafrost en anglais) est un sous-sol gelé pendant au moins deux années consécutives.

de vouloir réinventer la roue, alors que des sociétés ont déjà mis au point des technologies pour le spatial directement utilisables, souligne Philippe Keckhut. *L'autre réalité française des projets CubeSats, c'est qu'ils sont souvent gérés par un enseignant entouré de plusieurs dizaines d'étudiants sans expérience. Après nous être aperçus que nous n'y arriverions pas avec cette approche, nous avons commencé à penser à la filière complète. Dans cette perspective, la coopération internationale nous convenait mieux. »*

> **“Comme nous avions la main sur le dispositif complet, nous n'avons pas été bloqués [par la pandémie]”**
>
> ***Mustapha Meftah,*** *concepteur d'UVSQ-SAT*

Restait à trouver le financement, une gageure pour un laboratoire sans fonds propres, dont le budget plafonne à 300 000 euros, quand les sommes nécessaires à la construction d'un nanosatellite sont évaluées de 3 à 8 millions d'euros… Commence alors une période d'économies drastiques qui leur permet d'acheter les premières briques technologiques. Mais cela ne suffit pas. La solution qu'ils imaginent alors est de créer des synergies avec des partenaires industriels, dont certaines applications ont besoin d'être testées en orbite, moyennant le paiement d'une contribution financière à la mission. La nano-agence spatiale vient de trouver son modèle de fonctionnement. UVSQ-SAT sera donc son premier satellite, développé à partir de 2018. *« Nous étions les derniers à intégrer le programme Inspire,* observe Mustapha Meftah. *Mais, au final, UVSQ-SAT sera le premier satellite de cette coopération à être mis en orbite ! »* Un seul CubeSat (1U) le compose. Et les éléments qui permettent de l'assembler sont des pièces standards vendues dans le commerce, d'où la rapidité de son développement. Et la pandémie de 2020 n'a en rien bouleversé le calendrier ! *« Comme nous avions la main sur le dispositif complet, nous n'avons jamais été bloqués »,* constate Mustapha Meftah. Mieux : pour éviter les quarantaines imposées hors de nos frontières, le laboratoire a fait appel aux industriels français, dont les carnets de commandes s'étaient allégés du fait de l'épidémie. *« Cela a été une belle aventure »,* conclut le scientifique, qui veut pérenniser ce modèle local pour les prochaines missions. Les scientifiques du Latmos ont en effet besoin de disposer, d'ici à dix ans, d'une constellation d'au moins dix satellites en orbite héliosynchrone, une trajectoire qui leur permet de conserver une position fixe par rapport à la direction du Soleil. Sur cette orbite, le temps de revisite d'une région est de dix jours. Donc, avec dix satellites décalés sur l'orbite et postés entre 450 et 600 km d'altitude, il sera possible de faire des mesures quotidiennes de l'intégralité de la surface terrestre.

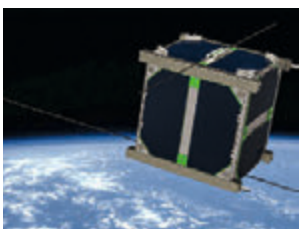
Le deuxième satellite de cette constellation, déjà en cours de développement, devrait être lancé courant 2021. Il sera composé de deux CubeSats (2U). Le troisième, mis au point avec le Cnes, de 3U, etc. À partir de 6U, le satellite sera équipé d'un moteur nécessaire à sa désorbitation en fin de vie, afin de respecter la loi sur les objets spatiaux. *« Nous voulons développer des projets en moins de trois ans, un temps compatible avec nos programmes de recherche,* analyse Philippe Keckhut. *Alors que les missions spatiales classiques nécessitent parfois plusieurs dizaines d'années. À une période où le climat s'emballe et où tous les indicateurs semblent converger vers le chaos, nous avons besoin d'un accès plus rapide à l'espace et de moyens d'observation supplémentaires de recherche pour étudier les changements en cours. »* Chaque satellite possédera une base de douze capteurs infrarouges et ultraviolets, ainsi que quatre photodiodes dédiées à la mesure de l'éclairement solaire dans le continuum de Herzberg (lire l'encadré ci-contre). Le tout sera peu à peu complété par d'autres instruments de mesure des aérosols, de l'albédo (*), etc. *« Il y a des mécanismes d'amplification du changement climatique que l'on ne connaît pas, mais dont on constate les effets,* précise Philippe Keckhut. *Nous avons besoin d'imaginer des mesures complémentaires pour corriger les modèles et faire des prévisions. »*

Les flux de données seront traités grâce à l'intelligence artificielle afin d'obtenir toutes les trois heures une carte du bilan radiatif avec une résolution de quelques kilomètres. Cela permettra en outre d'étudier le climat régional principalement induit par l'impact des aérosols et des nuages, qui varient rapidement, spatialement et temporellement. Les instruments spécifiques à chaque mission seront élaborés et testés dans les nouvelles installations de la plateforme d'intégration et de

Deux objectifs scientifiques à atteindre

Le lancement du satellite UVSQ-SAT et des autres (deux planifiés, une cinquantaine à terme) qui le rejoindront en orbite basse pour former une constellation ont deux principaux objectifs scientifiques.

1. Mesurer le bilan radiatif de la Terre. Le rayonnement solaire ultraviolet du Soleil est en effet en partie absorbé par l'atmosphère, apportant au système climatique terrestre de la chaleur. La puissance totale de cette énergie thermique est estimée à 174 pétawatts. De son côté, le système sols, océans, atmosphère se refroidit en émettant un rayonnement infrarouge vers l'espace.



▲ *Le nanosatellite UVSQ-SAT représenté en orbite basse (vue d'artiste).*

Les deux rayonnements sont censés s'équilibrer, mais l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre conduit à un déséquilibre du bilan global, les rayonnements émis par la Terre étant absorbés par le système sols, océans, atmosphère. Cela explique l'élévation actuelle de la température moyenne globale de notre planète. Les mesures de cette variabilité du rayonnement au sommet de l'atmosphère, enregistrées par la future constellation de petits satellites, permettront de cartographier de manière continue et régionale l'évolution de cet indicateur, essentiel pour déterminer l'orientation future du climat.

2. Surveiller l'irradiance spectrale solaire à la longueur d'onde ultraviolette de 215 nanomètres. Cet indicateur est plus connu sous le nom de « continuum de Herzberg ». Il s'agit d'étudier une portion du spectre d'absorption dans le domaine ultraviolet de l'oxygène moléculaire qui compose la couche d'ozone. La molécule d'ozone est en effet composée de trois atomes d'oxygène (O_3), alors que l'oxygène en possède deux (O_2). Située entre 20 et 40 km d'altitude, la couche d'ozone fonctionne comme un parasol naturel qui absorbe une partie du rayonnement ultraviolet nocif du Soleil. D'elle dépend notamment la température dans la moyenne atmosphère de la Terre, qui peut ensuite influencer la circulation dans la basse atmosphère. Les mesures de cette constellation de satellites permettront de mieux appréhender le mécanisme d'amplification de l'impact des variations solaires via l'ozone, et donc de mieux en tenir compte dans les modèles climatiques. ■ S. R.

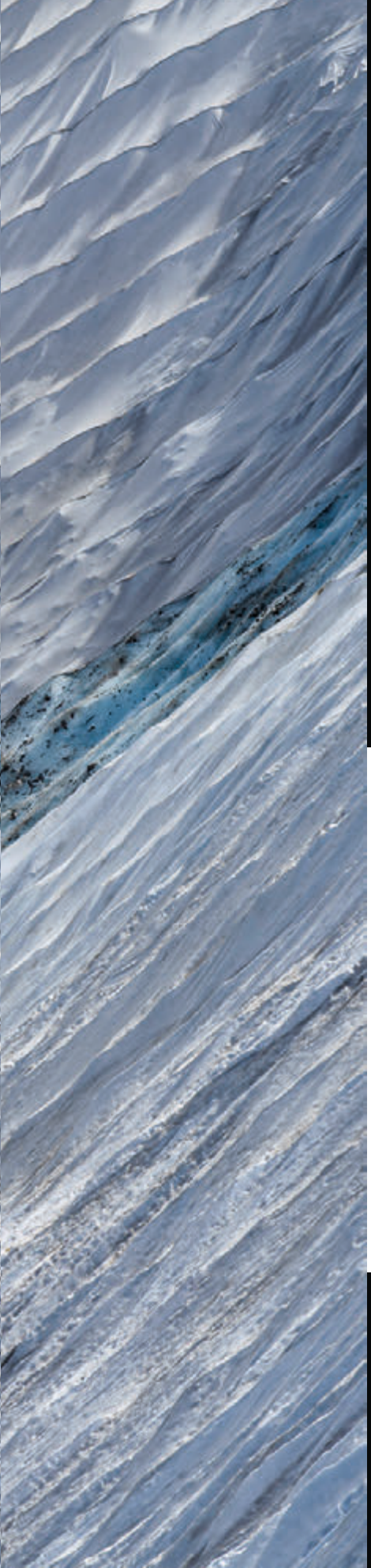
tests de l'observatoire de Versailles, consacrées au développement de cette filière spatiale miniaturisée (salles blanches, laboratoire de validation des différents détecteurs).

PLUSIEURS TESTS PRÉVUS EN ORBITE

Le partenaire commercial d'UVSQ-SAT est la petite société Carta-Rouxel, située à Gargenville, dans les Yvelines, qui a mis au point un vêtement connecté dans le cadre des maladies dégénératives. Équipé d'un détecteur, il permet de connaître à distance les positions du corps du malade et de prévenir ses douleurs. Carta-Rouxel souhaite adapter ce détecteur au secteur spatial, pour le suivi à distance des astronautes. UVSQ-SAT emportera donc en orbite ce capteur de position, qui servira du même coup à vérifier sa propre position. Chaque satellite de la filière emportera de la même manière un instrument développé par des industriels en vue de le tester dans l'espace. Soit un atout de financement essentiel : le prix d'UVSQ-SAT est de 2,5 millions d'euros, dont 100 000 rien que pour le lancement. Les capteurs ultraviolets sont eux-mêmes issus d'un partenariat économique. *« Ce satellite est une première étape de démonstration,* souligne Philippe Keckhut. *Un accident au lancement est toujours possible, mais nous avons déjà gagné notre pari en mettant en place cette filière. Il est compliqué de faire émerger un tel projet, avec des concepts purement français. Nous ne sommes qu'une poignée de chercheurs à nous battre tous les jours pour trouver des opportunités, car nous n'avons pas les gros acteurs traditionnels du spatial avec nous. Les idées fusent, mais le système administratif est trop lourd et bien trop long. C'est difficile, en France, de sortir du sillon. »* Il semble pourtant que le Latmos y soit parvenu, avec succès. ■ **Sylvie Rouat**

NASA / LATMOS

(*) **L'albédo** est la fraction de l'énergie solaire réfléchie par une surface, et caractérise donc son pouvoir de réflexion.



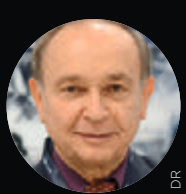
Un glacier sous couverture

La fonte des glaciers est emblématique du changement climatique. Que faire ? Lutter au niveau global ou s'adapter en tentant de limiter les dégâts ? La couverture du glacier Presena, en Italie, constitue un geste quasiment désespéré qui nous rappelle la force des éléments contre lesquels il sera difficile de lutter à long terme.

Une nouvelle fois, la station de sports d'hiver de Passo Tonale, en Italie, emmaillote son glacier. Un geste qu'elle accomplit chaque printemps depuis plus de dix ans. La couverture de 100 000 m² du glacier Presena, dont le sommet est situé à 3 000 m d'altitude, est vitale pour le ski jusqu'au début du mois de juin. La langue de glace recule en effet de 10 m tous les ans, et sa surface est ainsi passée de 68 à 41 hectares entre 1993 et 2003. Les techniciens déposent chaque année des bandes de géotextile de 70 m de long et 5 m de large, fournies par le leader mondial du secteur, l'Américain TenCate Geosynthetics, qu'ils enlèvent à l'automne. La bâche est garantie efficace pendant quatre saisons et est recyclable. Aux universités de Milan et de Trente, nous avons mesuré précisément l'efficacité de ces nouveaux géotextiles non tissés. Nos résultats montrent que la fonte est freinée de 69 % par rapport aux zones non couvertes et que l'albédo – la proportion de l'énergie solaire réfléchie vers l'espace – est augmenté de 50 % par rapport à la glace nue (1). Efficace donc, mais pour combien de temps encore ? Certains pensent que cette protection n'est qu'un pis-aller tant que les émissions de gaz à effet de serre continuent de croître. ■

(1) A. Senese *et al.*, *Cold Regions Science and Technology, 173*, 103007, 2020.

Photos : Michele Lapini



DR

Claudio Smiraglia
GÉOGRAPHE
Ancien professeur de géographie physique à l'université de Milan, Claudio Smiraglia est un spécialiste de la géographie de la montagne, principalement dans les domaines de la géomorphologie glaciale et de la glaciologie.

BRUNO BOURGEOIS

Le matériau de couverture est un polypropylène de 2 mm d'épaisseur composé de filaments continus placés dans le sens de la pente. L'une de ses propriétés est une perméabilité à l'air et à l'eau qui est donc évacuée par la pente, évitant ainsi qu'elle ne réchauffe la glace et ne la fasse fondre.

Les satellites Sentinel-2 du programme européen Copernicus suivent depuis 2015 et 2016 l'évolution des zones glacées montagnardes du monde entier. La couverture du glacier Presena permet de mieux appréhender la vitesse de fonte des glaces alpines.
www.copernicus.eu/en/media/image-day-gallery/presena-glacier

Les bandes de polypropylène sont soudées entre elles par chalumeau à gaz. Une autre propriété de cette structure est de mieux réfléchir le rayonnement solaire que la glace nue (50 % d'albédo en plus). Les glaciers n'abritant que peu de vie, l'impact sur la faune et la flore est limitée. Les scientifiques vont vérifier cependant si ce nouveau tissu en théorie imputrescible pourrait relarguer des polluants.

WALTER MITTELHOLZER, ETH-BIBLIOTHEK, ZÜRICH/ KIERAN BAXTER, UNIVERTÉ DE DUNDEE

1919-2019 : la mer de Glace à un siècle d'écart. Dans un hélicoptère au-dessus du Mont-Blanc, le chercheur écossais Kieran Baxter a reproduit à l'identique le cliché que le pilote suisse Walter Mittelholzer avait pris du glacier de la mer de Glace cent ans plus tôt.

UNE MENACE GLOBALE

Avec la hausse des températures et des précipitations neigeuses en baisse, les langues des glaciers s'assèchent et se rétractent dans tous les points du globe.

Partout dans le monde, les glaciers reculent. Selon le rapport spécial publié par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Giec) sur les océans et la cryosphère (les zones recouvertes de glace) paru en septembre 2019 (1), leur masse a diminué en moyenne de 123 milliards de tonnes par an entre 2006 et 2015. Ce chiffre cache d'énormes disparités. Si les glaciers himalayens résistent avec des pertes limitées à 150 kg de glace par mètre carré et par an, ceux de l'arc alpin maigrissent de 850 kg. Tout l'environnement montagnard monte en température. Ainsi, le permafrost, cette partie des roches des montagnes qui reste toujours en température négative, s'est réchauffé en moyenne de 0,19 °C lors de la dernière décennie.

Si les glaciers situés en zone tropicale se trouvent aujourd'hui très menacés (Kilimandjaro, Andes, par exemple), ceux des zones tempérées connaissent un déclin qui, en l'état actuel du changement climatique, devrait provoquer une réduction de surface de 80 % d'ici à la fin du siècle, préviennent les climatologues du Giec. Les chercheurs du laboratoire de glaciologie de Grenoble (LGGE) ont pu mesurer, grâce à l'imagerie satellitaire, une diminution de 25 % des surfaces englacées alpines entre 2003 et 2015, et la vitesse de fonte a été multipliée par trois. Là encore, l'altitude compte. Le Mont-Blanc enregistre des pertes de 1 % par an, quand les massifs des Écrins et de la Vanoise, plus bas, enregistrent 2,6 % d'amaigrissement. Il semble que la barre des 3 000 m de hauteur – celle de Presena en Italie – constitue une limite à partir de laquelle la fonte est plus importante. Et la disparition plus probable. ■

Loïc Chauveau

(1) ipcc.ch/srocc/chapter/chapter-2

Abonnez-vous !

+50% de réduction !

Versions papier ET numérique

Challenges

1 AN - 44 numéros

en **versions papier ET numérique**

+ l'accès à tous les articles sur le site Challenges.fr

49 €

au lieu de ~~184,80 €~~

SEULEMENT

+ UNE PARURE DE STYLOS (Bille-roller-mine) **EN CADEAU**

StudioLiVerte

Bulletin d'abonnement

À retourner dès aujourd'hui accompagné de votre réglement à : Challenges Service abonnement - 45 avenue du Général Leclerc 60643 CHANTILLY CEDEX

☐ **OUI,** je m'abonne **1 AN** - 44 numéros en **versions papier ET numérique** à Challenges
+ EN CADEAU **une parure de stylos**
au **prix de 49 € seulement** au lieu de ~~184,80 €~~
soit 135,80 € de réduction

Je joins mon règlement de 49 € par :

☐ Chèque bancaire, ou postal à l'ordre de Challenges
☐ Carte Bancaire

N° CB

Expire fin M M A A

Date et signature obligatoires

☐ Mme ☐ Mlle ☐ Mr

Nom

Prénom

Adresse

Code postal Ville

Pour recevoir la version numérique, merci d'indiquer votre e-mail.

Mon e-mail

☐ *Je souhaite être informé(e) par email des offres de Challenges et de ses partenaires.*

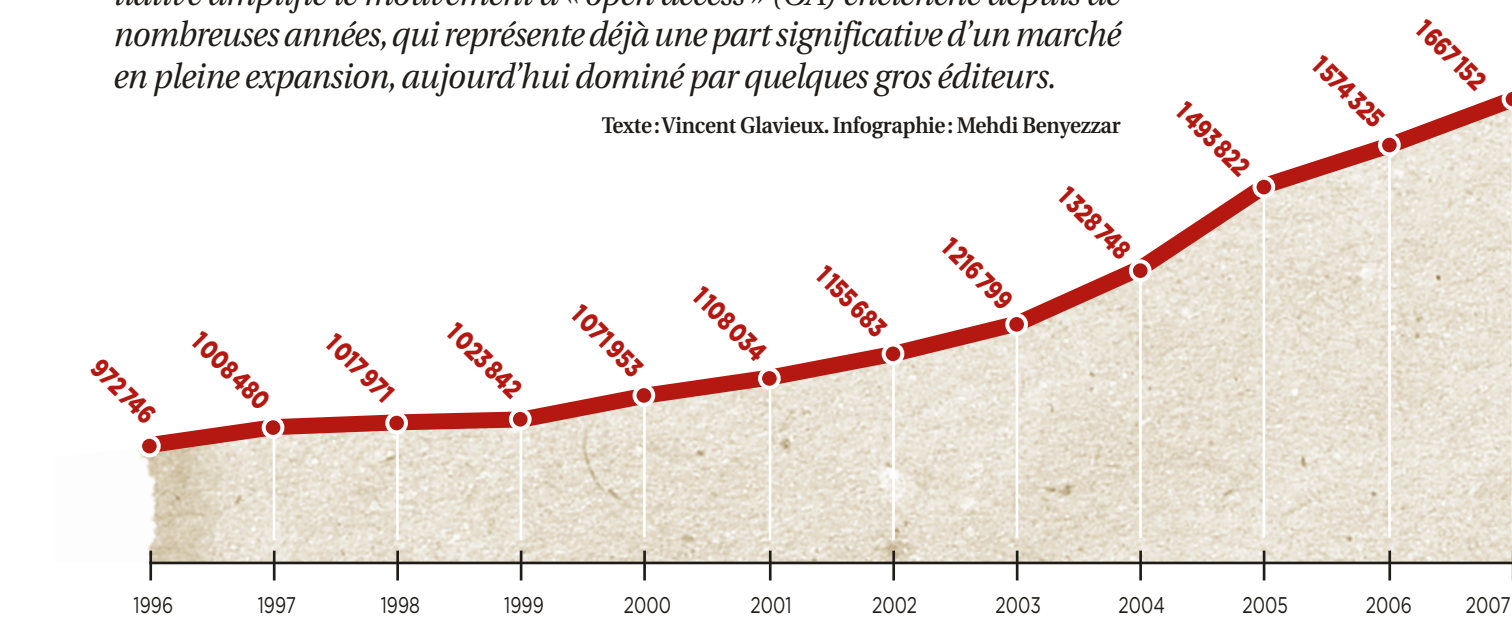
7B21XH1

Offre valable réservée aux nouveaux abonnés en France Métropolitaine, pour tout abonnement à l'étranger, merci de nous contacter : abonnement@challenges.fr. Vous pouvez acquérir chacun des numéros de Challenges au prix de 4,20 €. La société Challenges située au 41bis avenue Bosquet, Paris 7ème est responsable de traitement et collecte des données afin de permettre la gestion de votre abonnement au magazine Challenges sur la base de la relation contractuelle établie. Vos données pourront être transmises à d'autres organismes (presse, VAD, caritatif) et sont conservées pour une durée de 7 ans à partir de votre désabonnement. Vous pouvez exercer vos droits d'accès, de rectification, de limitation, de portabilité, d'opposition, d'effacement au traitement de vos données et définir vos directives post-mortem à l'adresse dpo@challenges.fr en joignant une copie de votre carte d'identité. La société Challenges dispose d'un délégué à la protection des données pouvant être contacté à dpo@challenges.fr. À tout moment vous pouvez introduire une réclamation auprès de la CNIL.

L'édition scientifique fait sa révolution

L'année 2021 marque un tournant dans l'édition scientifique. Depuis le 1er janvier, c'est en libre accès que doivent être publiés les travaux soutenus par 25 organisations internationales de financement de la recherche (dont l'OMS ou, en France, l'ANR), regroupées dans la « Coalition S ». Cette initiative amplifie le mouvement d'« open access » (OA) enclenché depuis de nombreuses années, qui représente déjà une part significative d'un marché en pleine expansion, aujourd'hui dominé par quelques gros éditeurs.

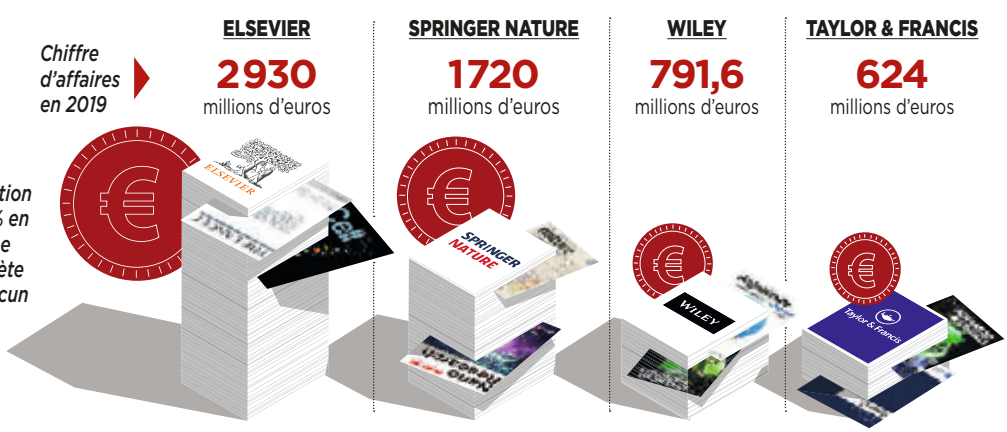
Texte : Vincent Glavieux. Infographie : Mehdi Benyezzar

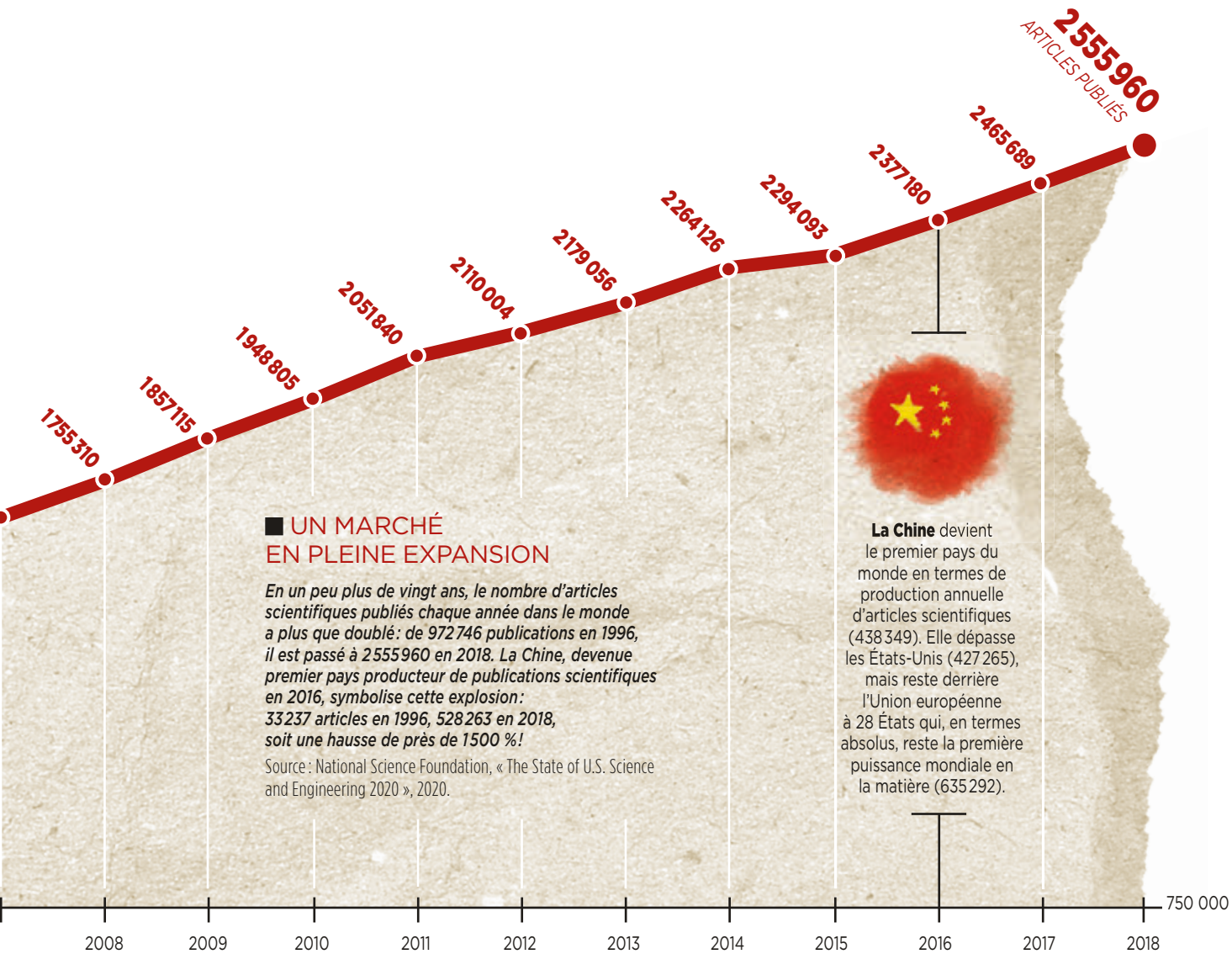


LA DOMINATION DE QUATRE ÉDITEURS

À eux seuls, Elsevier, Springer Nature, Wiley et Taylor & Francis représentent 50,2 % de la production scientifique en sciences, et 55,7 % en sciences humaines et sociales. Une position ultra-dominante que reflète le chiffre d'affaires annuel de chacun de ces éditeurs scientifiques en langue anglaise.

Sources : Relx, Springer Nature, Wiley, Informa.





UN MARCHÉ EN PLEINE EXPANSION

En un peu plus de vingt ans, le nombre d'articles scientifiques publiés chaque année dans le monde a plus que doublé : de 972 746 publications en 1996, il est passé à 2 555 960 en 2018. La Chine, devenue premier pays producteur de publications scientifiques en 2016, symbolise cette explosion : 33 237 articles en 1996, 528 263 en 2018, soit une hausse de près de 1500 % !

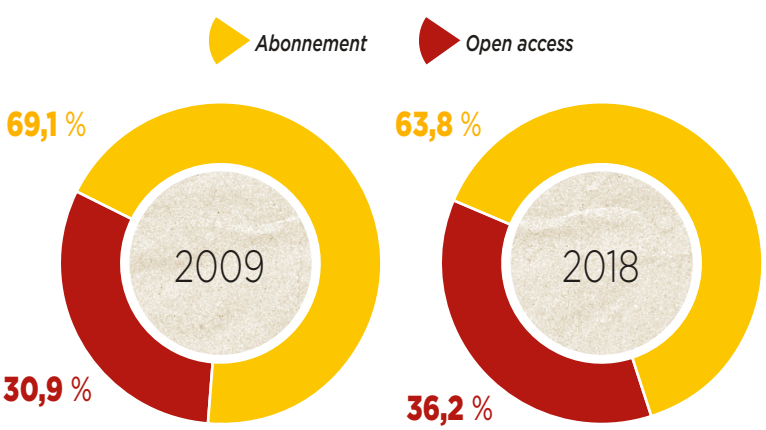
Source : National Science Foundation, « The State of U.S. Science and Engineering 2020 », 2020.

La Chine devient le premier pays du monde en termes de production annuelle d'articles scientifiques (438 349). Elle dépasse les États-Unis (427 265), mais reste derrière l'Union européenne à 28 États qui, en termes absolus, reste la première puissance mondiale en la matière (635 292).

L'OPEN ACCESS EN LÉGÈRE PROGRESSION

Sur les dix dernières années, la proportion de publications scientifiques disponibles en libre accès dans le monde a progressé. Mais cette statistique est à prendre avec précaution : elle ne précise pas dans quelle mesure la hausse est due à la parution d'articles directement en open access ou seulement à la mise en libre accès de travaux plus anciens.

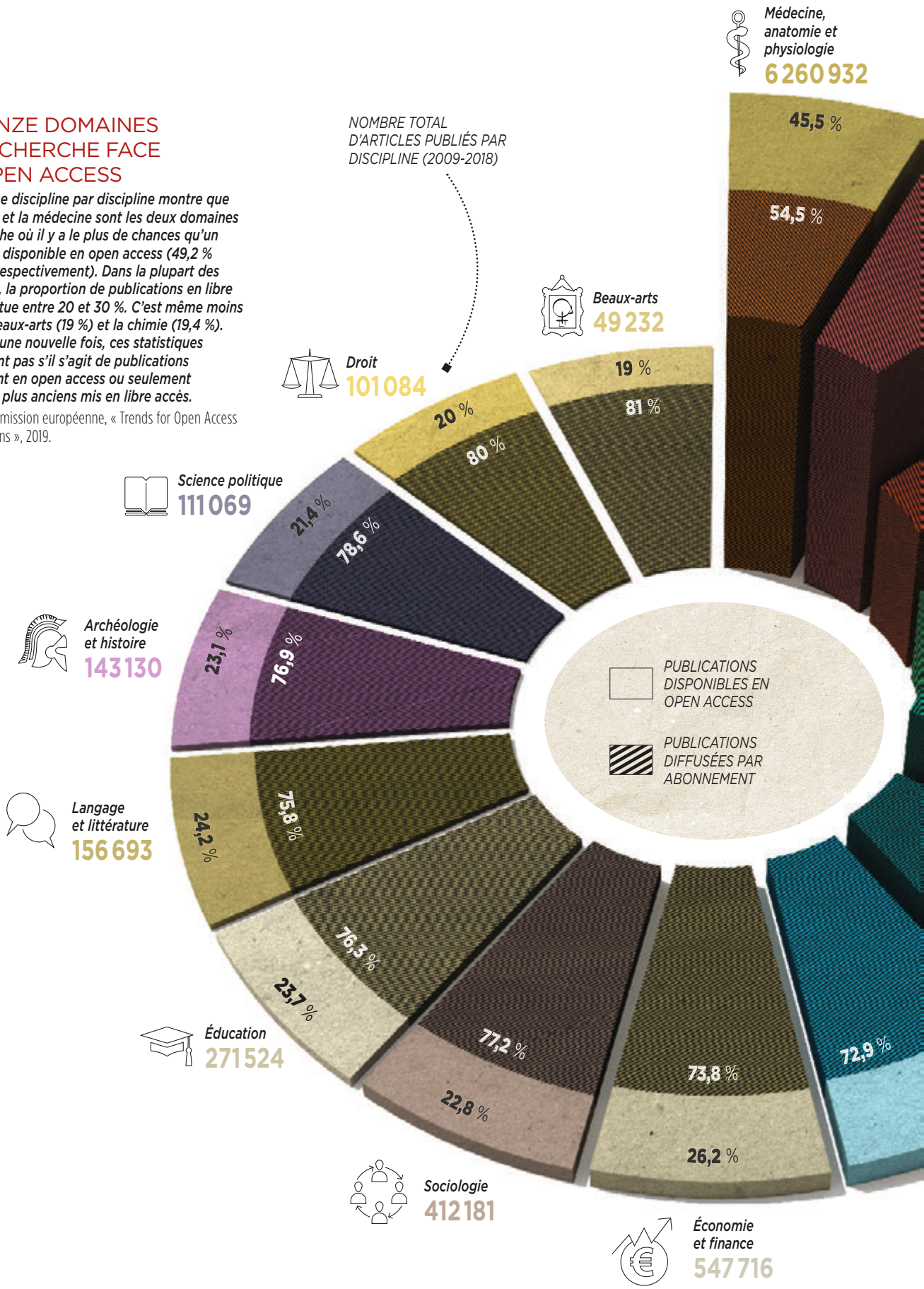
Source : Commission européenne, « Trends for Open Access to Publications », 2019.

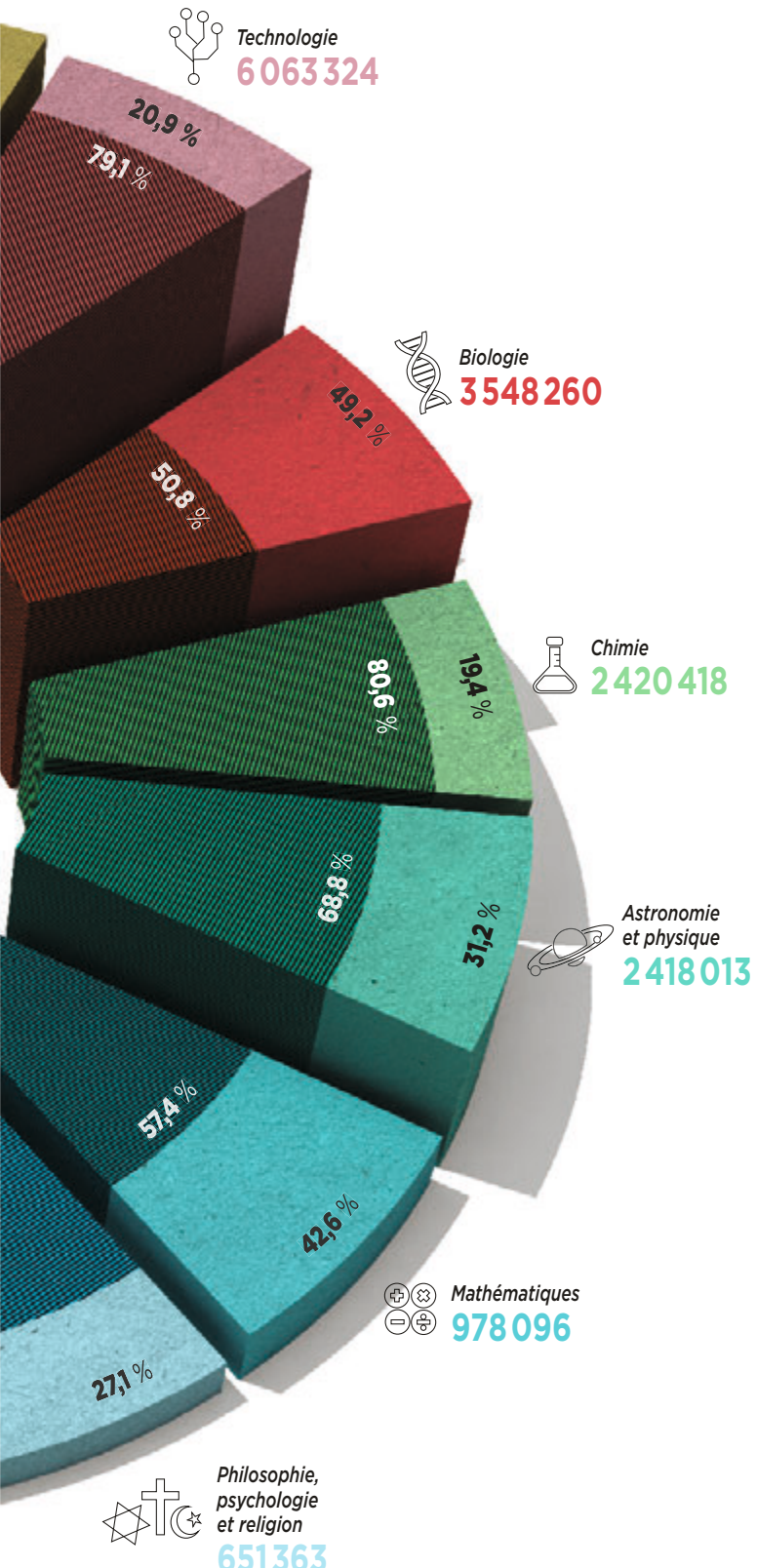


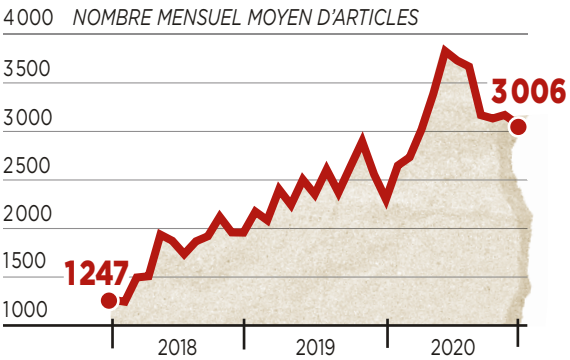
QUINZE DOMAINES DE RECHERCHE FACE À L'OPEN ACCESS

Une analyse discipline par discipline montre que la biologie et la médecine sont les deux domaines de recherche où il y a le plus de chances qu'un article soit disponible en open access (49,2 % et 45,5 % respectivement). Dans la plupart des disciplines, la proportion de publications en libre accès se situe entre 20 et 30 %. C'est même moins pour les beaux-arts (19 %) et la chimie (19,4 %). Attention, une nouvelle fois, ces statistiques ne précisent pas s'il s'agit de publications directement en open access ou seulement de travaux plus anciens mis en libre accès.

Source : Commission européenne, « Trends for Open Access to Publications », 2019.







BIORXIV, UN BOOM LIÉ À LA PANDÉMIE ?

BioRxiv est une plateforme de prépublication en ligne en open access : les articles qui y sont répertoriés n'ont pas encore été soumis à la validation par les pairs. Depuis son lancement en novembre 2013, 102 648 articles y ont été déposés. La période depuis le mois de mars 2020 montre une nette augmentation du nombre mensuel moyen d'articles ajoutés : un bond sans doute lié à la globalisation de l'épidémie de Covid-19.

Source : Rxvist.org

TROIS GRANDS ACTEURS DE L'OPEN ACCESS, TROIS APPROCHES

arXiv.org	SCIENTIFIC REPORTS	SCI-HUB
Date de création 1991	**Date de création** 2011	**Date de création** 2011
Nombre d'articles 1 814 411	**Nombre d'articles** 121 651	**Nombre d'articles** 84 794 279
Nombre de téléchargements 1,86 milliard	**Nombre de téléchargements** 128 millions	**Nombre de téléchargements** + de 1 milliard

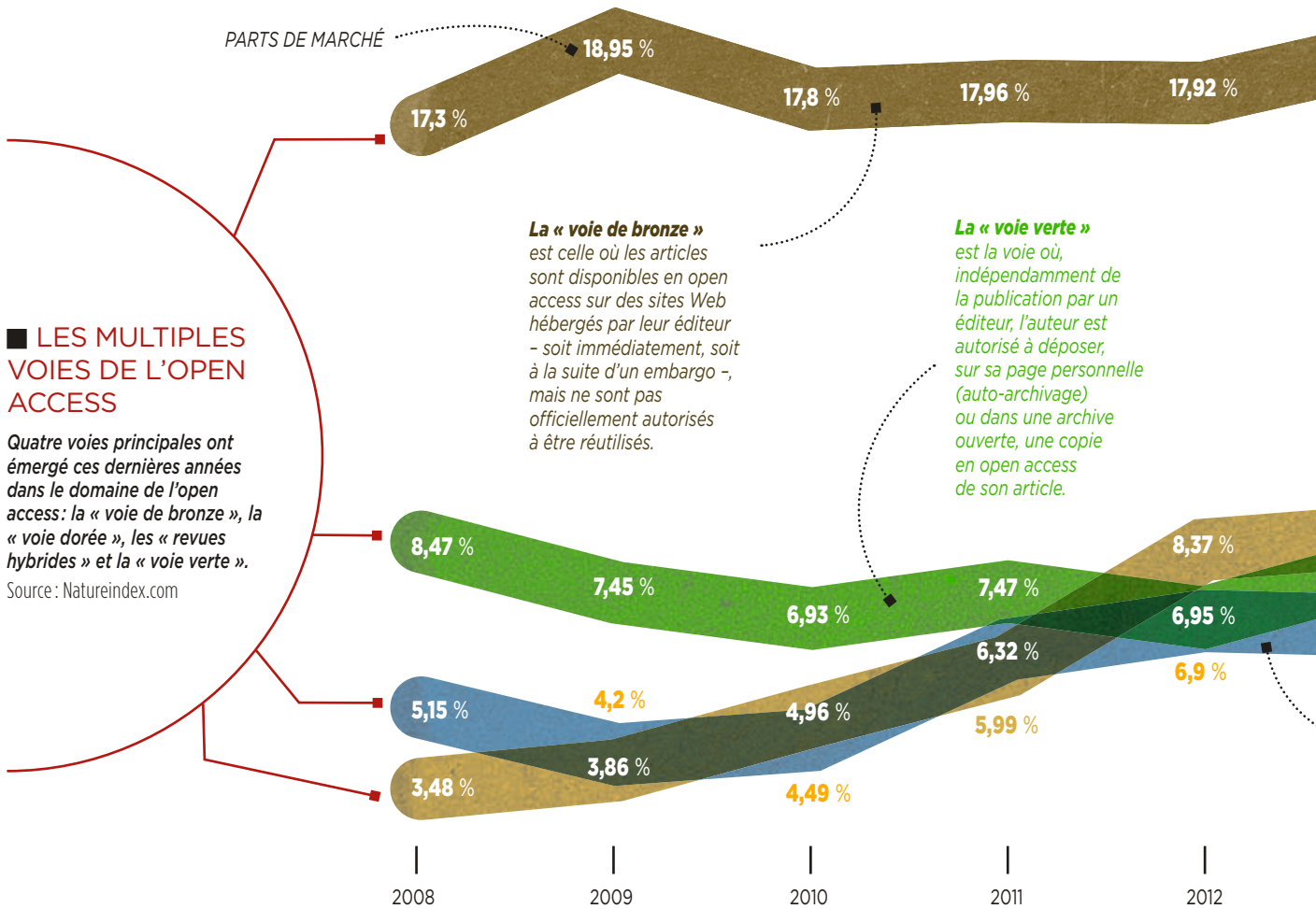
ArXiv, Scientific Reports et Sci-Hub contribuent grandement au mouvement de l'open access, chacun à leur manière. ArXiv est le pionnier des plateformes de prépublication en ligne en open access, dans les domaines de la physique et des mathématiques notamment. Scientific Reports est le principal journal multidisciplinaire avec système d'évaluation par les pairs en open access (une « mégarevue »). Quant à Sci-Hub, il s'agit d'un site pirate qui donne accès gratuitement, de manière illégale, à des dizaines de millions de publications scientifiques.

Sources : arXiv, Scientific Reports, Sci-Hub.

LES MULTIPLES VOIES DE L'OPEN ACCESS

Quatre voies principales ont émergé ces dernières années dans le domaine de l'open access : la « voie de bronze », la « voie dorée », les « revues hybrides » et la « voie verte ».

Source : Natureindex.com



CINQ CRITÈRES POUR UNE REVUE EN OPEN ACCESS DE HAUTE QUALITÉ

D'après les Predatory Reports de Cabells, le nombre de revues prédatrices est aujourd'hui supérieur à 13 000… soit presque autant que les bonnes revues en OA (environ 15 500) recensées par la base DOAJ. Voilà pourquoi la Coalition S a défini un certain nombre de critères pour s'y retrouver.

Sources : Coalition S, « Accelerating the Transition to Full and Immediate Open Access to Scientific Publications », 2020.

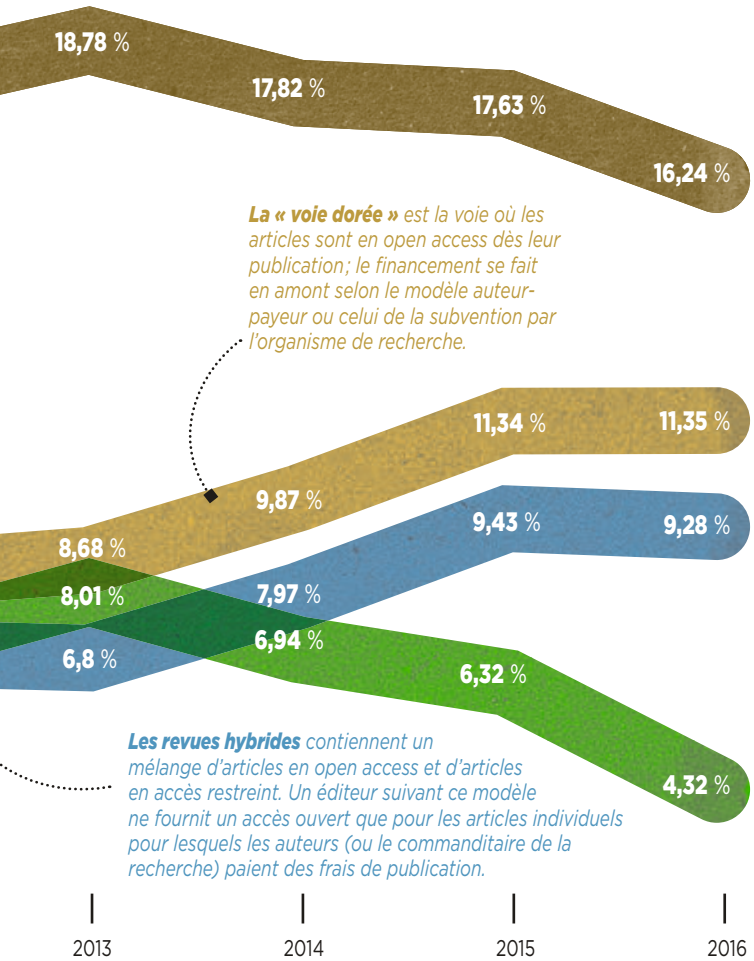
Disposer d'un système solide de revue par les pairs conforme aux normes de la discipline concernée.

Fournir une description détaillée de ses politiques éditoriales et de ses processus décisionnels, ainsi que des statistiques annuelles de base : nombre de soumissions, nombre de revues par des pairs demandées et reçues, taux d'approbation, délai moyen entre la soumission et la publication.

Accepter la conservation des droits d'auteur par les auteurs ou leurs institutions, sans frais supplémentaires.

Permettre aux auteurs de publier leur article en libre accès immédiat et permanent sous une licence ouverte, ou de déposer la version acceptée ou la version finale dans un dépôt en libre accès, sans frais supplémentaires et sous une licence ouverte.

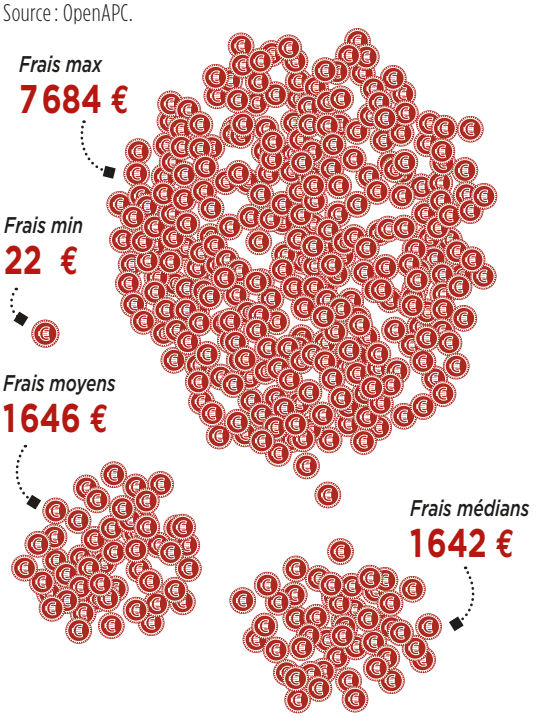
Remplir certaines conditions techniques pour tous les articles : identifiants permanents (type DOI), métadonnées de haute qualité et facilement accessibles, etc.



UNE GRANDE DISPARITÉ DE TARIFS

Open access ne veut pas dire gratuité et, d'un éditeur à l'autre, les frais de traitement des articles (aussi appelés frais de publication), généralement payés par l'institution de l'auteur ou l'organisme qui a financé sa recherche, peuvent connaître des disparités gigantesques, comme le montrent les chiffres ci-dessous pour l'année 2019. Tout récemment (novembre 2020), les tarifs annoncés par Springer Nature pour qu'un article publié dans Nature *ou l'une de ses 32 revues filles soit disponible en open access – jusqu'à 9500 euros par article – ont d'ailleurs suscité beaucoup d'émoi chez les scientifiques.*

Source : OpenAPC.



SCIENTIFIQUES ET OPEN ACCESS ? PAS UNE ÉVIDENCE

Du point de vue des chercheurs, il ne va pas de soi de publier en open access… En France, le consortium Couperin a mené en 2019 une enquête sur les pratiques de publication et d'accès ouvert des chercheurs du pays. Elle dessine un profil des disciplines où l'open access a le plus (sciences du vivant) et le moins (sciences de l'ingénieur) de succès, et les raisons qui poussent à publier ou non en open access.

Source : consortium Couperin, « Les pratiques de publications et d'accès ouvert des chercheurs français en 2019 », 2019.

Les principales raisons de publier en open access

Donner un accès immédiat aux pairs et au grand public (5 444 sur 6 304 répondants)	86,4 %
Augmenter la visibilité de sa recherche (4 871 sur 6 305 répondants)	77,3 %
Participer au mouvement de l'open access (4 459 sur 6 290 répondants)	70,9 %

Les principales raisons de refuser de publier en open access

Refus de payer des frais de traitement des articles (1 497 sur 3 674 répondants)	40,7 %
L'occasion ne s'est pas présentée (1 488 sur 3 674 répondants)	40,5 %
Appréhension quant à la qualité des revues (1 381 sur 3 674 répondants)	37,6 %

Entretien avec **Françoise Combes**

« Il reste de grands défis à relever en astrophysique »

« Curiosité, imagination, aller au fond des choses » : telles sont, pour Françoise Combes, qui vient de recevoir la prestigieuse médaille d'or du CNRS, les qualités d'un astrophysicien ou d'une astrophysicienne. Son parcours et sa carrière, exemplaires, lui ont permis de mieux comprendre les galaxies, ces assemblées de centaines de milliards d'étoiles qui peuplent le cosmos. Vertige de l'astrophysique qui nous autorise, grâce aux instruments de plus en plus performants et aux moyens de calcul décuplés, à écrire une histoire universelle, au premier sens du terme, mais encore empreinte de bien des mystères. Une aventure que la chercheuse poursuit avec ses étudiants et qu'elle partage dans son enseignement au Collège de France. Invitation au voyage, de notre Galaxie jusqu'aux confins du cosmos.

ED ALCOCK / MYO.P. 2020 POUR LA RECHERCHE

Françoise Combes
ASTROPHYSICIENNE, PROFESSEURE AU COLLÈGE DE FRANCE
Spécialiste de la formation et de l'évolution des galaxies, elle étudie leur dynamique à l'aide de simulations et observe le cosmos, notamment dans le domaine millimétrique. Elle s'intéresse aux processus galactiques, aux modèles de matière noire et aux hypothèses de gravité modifiée.

BIO

- **1952** Françoise Combes naît à Montpellier.
- **1975** Après une thèse de troisième cycle, elle commence une carrière d'enseignante-chercheuse à l'École normale supérieure (ENS).
- **1980** Elle soutient une thèse d'État sur la dynamique et la structure des galaxies.
- **1985** Elle devient directrice adjointe du laboratoire de physique de l'ENS.
- **1989** Elle obtient un poste d'astronome à l'Observatoire de Paris.
- **Depuis 2003** Elle est éditrice de la revue *Astronomy & Astrophysics*.
- **2004** Elle devient la première femme astronome élue à l'Académie des sciences.
- **2014** Elle est élue professeure au Collège de France, titulaire de la chaire Galaxies et cosmologie.
- **2020** Elle reçoit la médaille d'or du CNRS.

La Recherche **Au début du XXe siècle, les astronomes s'écharpaient sur la nature des « nébuleuses » que l'on voyait dans le ciel. On sait maintenant que ces nébuleuses sont des galaxies réparties dans l'Univers et que nous sommes dans l'une d'elles : la Voie lactée. Notre Galaxie est-elle typique de celles que l'on rencontre dans l'Univers ?**

Françoise Combes La Voie lactée est assez typique des galaxies spirales, ces rassemblements de centaines de milliards d'étoiles que l'on trouve par milliards dans l'Univers. Seulement, c'est une galaxie spirale qui a un tout petit bulbe central, notamment quand on le compare à celui de notre voisine Andromède *[située à 2 millions d'années-lumière, NDLR]*, qui est également une galaxie de forme spirale. L'origine de ces deux bulbes est très différente, sans doute parce que l'histoire de ces deux galaxies diffère elle aussi : les données astrométriques du satellite Gaia ont ainsi montré que la dernière fusion majeure qu'a subie la Voie lactée remonte à 10 milliards d'années et que, depuis, elle a été relativement tranquille, elle n'a avalé *[sic]* que quelques petites galaxies satellites qui passaient par là. Du coup, son bulbe résulte de sa propre dynamique interne.

C'est différent pour Andromède ?

Oui, Andromède est une galaxie avec des bras et des boucles de marée bien visibles, qui dépassent de tous les côtés. Cela signifie qu'elle a connu un passé beaucoup plus agité que la Voie lactée, au cours duquel elle a subi de nombreuses fusions conséquentes. Quant à son gros bulbe central, il résulte des collisions passées. Un phénomène analogue à ce qui se passe lorsque deux galaxies spirales coalescent. Lorsque ce type d'événement se produit, la galaxie résultante prend une forme elliptique et les orbites des étoiles en son sein sont très mélangées, désordonnées ; il n'y a plus de rotation, il n'y a plus de moment cinétique non plus.

Notre Galaxie contient une structure d'étoiles particulière qu'on appelle une barre. C'est une structure qui s'ajoute à la forme spirale ?

En effet. Il s'agit d'un rassemblement d'étoiles qui sont alignées, prenant la forme d'une barre. La plupart des galaxies spirales en possèdent : on les appelle des spirales barrées. C'est quelque chose dont on ne se doutait pas au début, car ces barres ne sont pas toujours faciles à voir directement, dans la lumière visible. De plus, il s'agit de structures dynamiques qui apparaissent et disparaissent au cours de la vie des galaxies. Ainsi, il a été établi que 20 % des galaxies spirales lointaines possèdent des barres, contre 65 % pour les galaxies plus locales (1). Pour notre Galaxie, dès 1975, l'Américain W. L. Peters III avait vu qu'il y avait des perturbations de vitesse du gaz autour de son centre (2). Or si les mouvements étaient circulaires, comme c'est le cas en l'absence de barre, il n'y aurait aucune perturbation de vitesse, et même une vitesse Doppler (*) nulle dans la direction du centre galactique. Peters en avait conclu la présence d'une barre, mais que l'on ne voyait pas directement. Il a fallu attendre l'arrivée du satellite Cobe, dans les années 1990, pour parvenir à la repérer. Conçu pour étudier le rayonnement du fond diffus cosmologique (*), Cobe a cartographié le ciel dans le domaine micro-onde et dans l'infrarouge. Or ce type de rayonnement perce à travers les poussières abondantes du centre de la Galaxie, ce qui a permis de mettre en évidence la barre de la Voie lactée.

Qu'il s'agisse de barre ou de structure spirale, la gravitation est-elle bien la force dominante qui dessine les galaxies ?

Oui, pour les galaxies et pour la structure de l'Univers, la gravitation est bien l'interaction principale. Autrefois, les astrophysiciens ne pensaient pas pouvoir expliquer la présence de longs filaments dépassant de certaines galaxies avec uniquement des interactions gravitationnelles, avec des forces de marée. On estimait qu'il fallait invoquer la présence de tubes de champs magnétiques. Or c'était une erreur. À la fin des années 1970, lorsque les simulations numériques ont commencé à se développer, on a découvert qu'il était possible de former des filaments – ce que l'on appelle aujourd'hui des queues de marée – uniquement avec la gravité. Et pas seulement les queues de marée, mais aussi les bras spiraux et les barres. C'est pourquoi une grande partie de nos travaux actuels concerne la dynamique gravitationnelle.

La vision que l'on avait des galaxies et de leur évolution a-t-elle beaucoup changé grâce aux travaux sur la dynamique et grâce aux observations ? La classification

“Grâce aux puissants instruments disponibles, on peut étudier des galaxies qui se sont formées dans les premiers âges de l’Univers”

d’Edwin Hubble sur la forme des galaxies est-elle toujours de mise ?

La classification qu’Hubble avait formulée en 1936 est toujours juste : il y a des galaxies elliptiques, des galaxies spirales, des galaxies en forme de lentille (« lenticulaires »), des galaxies de forme irrégulière. Ces formes très variées étaient déjà observées dans la première moitié du XXe siècle. En ce sens, la classification est toujours valide. Ce qui a changé, c’est le sens de l’évolution entre ce qu’on pensait être des galaxies précoces ou tardives. Naguère, il semblait que les premières galaxies étaient des galaxies simples, de forme elliptique, avec uniquement des étoiles, sans poussière et sans gaz, et qu’ensuite elles devenaient des galaxies évoluées, spirales, avec du gaz. En réalité, c’est exactement le contraire : les premières galaxies à se former sont des galaxies spirales qui, ensuite, à force de collisions, prennent des formes elliptiques. Mais des spirales peuvent se reformer ensuite.

Comment s’est-on aperçu de cela ?

Aujourd’hui, nous avons à observer des millions de galaxies. Il n’est plus possible de les regarder de manière individuelle comme auparavant : il faut effectuer des statistiques sur un grand nombre de données et d’objets à classifier, ce qui nécessite de faire appel à l’apprentissage statistique *(machine learning)*. La procédure consiste à mettre un point pour chacune des galaxies dans un diagramme qui montre la relation entre sa couleur et sa magnitude absolue (*), c’est-à-dire la luminosité ou la masse de la galaxie – ce que nous appelons un diagramme magnitude-couleur. Dans ce diagramme, on voit apparaître des séquences. Il existe une séquence rouge, celle des galaxies elliptiques : toutes les étoiles y sont rouges, vieilles, il n’y a pas de gaz. Et puis il y a une séquence bleue, celle des galaxies spirales, qui ont beaucoup de gaz et beaucoup d’étoiles jeunes. Et, en regardant bien, c’est la classification d’Hubble qui transparaît.

Comment l’évolution des galaxies s’inscrit-elle dans l’évolution de l’Univers ?

Non seulement on observe des millions et des millions de galaxies mais, grâce aux puissants instruments disponibles, comme les télescopes spatiaux Hubble ou Spitzer (infrarouge), il est possible d’étudier des galaxies très lointaines et donc très jeunes. Celles-ci se sont formées dans les premiers âges de l’Univers. Pour rappel, l’Univers est issu d’un Big Bang qui s’est produit il y a environ 13,7 milliards d’années et qui a été suivi par une grande expansion qui a encore cours aujourd’hui. Dans cette histoire, l’évolution des galaxies dépend beaucoup de l’environnement initial : selon qu’il est peu dense, c’est-à-dire avec des vides, ou au contraire surdense, l’évolution ne se fera pas à la même vitesse. Par exemple, dans un environnement initial surdense, rempli d’amas de galaxies, cela va très vite : quelques centaines de millions d’années après le Big Bang, il existe déjà des galaxies très évoluées, elliptiques, massives et rouges. À l’inverse, les galaxies isolées – les galaxies de champ, comme on les appelle – ont une évolution lente. Il faut parfois plus de 13 milliards d’années pour que deux galaxies spirales fusionnent et se transforment en une galaxie elliptique.

La mystérieuse matière noire joue-t-elle un rôle dans cette évolution ?

Oui, la matière noire – dont on ignore la nature, mais dont on perçoit les effets gravitationnels à toutes les échelles – est essentielle. Les modèles

(*) La vitesse Doppler est une vitesse radiale – le long de la ligne de visée – qui est déduite du décalage spectral mesuré sur des objets astronomiques. Plus l’objet se rapproche vite de nous, plus le décalage vers les petites longueurs d’onde est important ; et plus il s’éloigne, plus le décalage vers les grandes longues d’onde est élevé.

(*) Le fond diffus cosmologique est le rayonnement fossile qui a été émis 380 000 ans après le Big Bang. Ce vestige de l’Univers primordial est à une température équivalente à 2,7 kelvins.

(*) La magnitude absolue d’un astre est une mesure de la luminosité intrinsèque de l’objet, indépendamment de sa distance.

d'évolution de l'Univers ont absolument besoin de matière noire pour fonctionner : sans elle, les fluctuations initiales de matière, qui sont les germes à partir desquels les forces gravitationnelles façonnent l'Univers, ne sont pas suffisantes pour former des galaxies.

Comment s'est établi le consensus sur l'existence de cette matière noire ?

L'histoire a commencé en 1933, il y a plus de quatre-vingts ans, lorsque l'astronome suisse Fritz Zwicky a évoqué la possibilité d'une matière gravitante non lumineuse pour expliquer la dynamique des galaxies dans les amas. À l'époque, personne ne se fiait à tout ce qu'il disait – il a aussi fait beaucoup d'erreurs et ne croyait notamment pas au Big Bang. Du coup, il a fallu du temps pour que son point de vue soit pris au sérieux. Mais, petit à petit, à mesure de l'accumulation des observations, l'idée s'est imposée de la nécessité de cette matière. De quoi pouvait-elle être constituée ? Jusqu'en 1985, on pensait qu'il s'agissait de matière ordinaire, mais non visible – après tout, il existe de la matière qui n'émet pas de lumière. Et puis, les expériences d'observation du fond diffus cosmologique – cette relique de l'Univers lorsqu'il est devenu transparent, 380 000 ans après le Big Bang – ont mis en évidence le fait que les fluctuations de ce fond étaient si petites qu'avec uniquement de la matière ordinaire – des baryons, essentiellement des protons et des neutrons qui constituent les noyaux atomiques que nous connaissons –, il n'était pas possible de former des galaxies.

Pour quelles raisons ?

Lorsqu'il y a un léger contraste de densité en un endroit du cosmos – un surplus quelque part –, ce contraste ne peut croître sous l'effet de la gravité que très lentement, à cause de l'expansion de l'Univers. Entre le moment où les baryons se libèrent des photons, 380 000 ans après le Big Bang, et aujourd'hui, ce contraste ne peut croître que d'un facteur 1 000. Pour former une structure, il faudrait alors des fluctuations primordiales de densité de l'ordre de 10^{-3}. Or les cartographies du fond diffus cosmologique établies à partir de 1985, grâce à l'expérience Boomerang (des ballons envoyés dans la stratosphère, à environ 37 km d'altitude, pour étudier ce rayonnement), faisaient apparaître des fluctuations initiales de l'ordre de 10^{-5}. Dès lors, il fallait absolument invoquer une matière qui n'interagisse pas avec les photons et qui permette une concentration de matière, un effondrement, bien avant la matière ordinaire. C'est là qu'est devenu évident le fait que la matière noire ne pouvait pas être baryonique, mais au contraire qu'il devait s'agir de matière exotique : une matière qui n'interagit pas avec la lumière – elle devrait donc plutôt s'appeler « matière transparente ».

Dans ce cadre, quel est le scénario d'évolution de l'Univers à partir du Big Bang ?

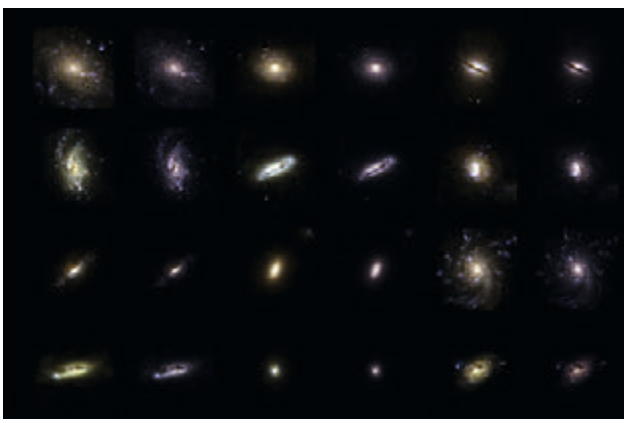
Jusqu'à 380 000 ans après le Big Bang, le moment où matière ordinaire et lumière sont couplées, la matière noire dite « froide » est indépendante de la lumière et peut commencer à s'effondrer. À l'inverse, dans cette époque prédécouplage, la matière ordinaire, visible, est en train d'être diffusée par la lumière et ne peut pas se rassembler. La matière noire se concentre donc et forme ce que l'on appelle des « halos noirs », qui sont les premières structures effondrées dans l'Univers. Ensuite, une fois que le découplage a lieu, la matière ordinaire se libère de la lumière en quelque sorte et peut s'effondrer à son tour. Le gaz tombe dans ces halos noirs et forme des étoiles.

Sur les questions de dynamique des galaxies et de l'évolution de l'Univers, ce sont les progrès en calcul numérique qui ont permis de mieux comprendre les choses ?

Indubitablement. Les progrès ont suivi de près la croissance de la puissance de calcul disponible. Sur la partie qui concerne la dynamique des galaxies, dans un article de 1964, les astronomes américains Chia-Chiao Lin et Frank Shu suggèrent que les structures spirales se forment par une instabilité gravitationnelle (3). Mais la difficulté est qu'il est impossible de faire des calculs analytiques – à la main – à moins que la spirale ne soit très enroulée. Ce qui n'est pas ce qui est observé la plupart du temps. Et les premières simulations numériques, à la fin des années 1970 et au début des années 1980, ont montré qu'il n'y avait pas toujours de spirale, mais toujours une barre. Or une barre, c'est le contraire d'une structure enroulée ! Cela a donné un coup de frein à ces théories analytiques qui ne permettent pas de reproduire les observations, et c'est le numérique qui a pris le dessus.

Des codes à toutes les échelles

La dynamique des galaxies a beaucoup progressé grâce aux codes numériques, mais c'est aussi le cas de la formation des galaxies dans un cadre cosmologique. La nouveauté, ce sont des codes qui combinent des simulations de cosmologie à grande échelle et des simulations « zoom » à petite échelle. Pour les grandes échelles, on modélise un volume de 100 mégaparsecs de côté *[3,1 × 10^{24} m ; à titre de comparaison, le diamètre de l'Univers observable est de l'ordre de 10^{26} m]* avec des dizaines de milliers de galaxies, voire des millions, qui se forment et évoluent. Dans les simulations « zoom », on focalise la puissance de calcul dans une sous-région, pour modéliser l'évolution d'une galaxie ou d'un amas dans son environnement cosmologique. En France, les numériciens ont démarré en 2006-2007



▲ *La simulation NewHorizon reproduit une diversité de morphologies des galaxies telle qu'on peut l'observer dans l'Univers.*

avec des simulations dites « hydrodynamiques », poussées par Romain Teyssier, alors au CEA Saclay. Déjà, des galaxies virtuelles y apparaissent spontanément, au gré de leur évolution. Vers 2014, la nouvelle génération de simulations, Horizon-AGN, avait pour objectif de prendre en compte le fait que la formation des trous noirs au cœur des galaxies réchauffe le gaz qui est susceptible de s'effondrer sur les plus massives, créant ainsi une grande diversité morphologique, avec des galaxies elliptiques et des spirales. Actuellement, les chercheurs terminent la simulation NewHorizon, qui représente un gain d'un facteur 40 en résolution. Cela permet de voir plus en détail les processus de formation des disques minces dans les galaxies spirales par exemple. Avec l'augmentation des capacités de calcul, il devient possible d'inclure de nouveaux ingrédients physiques dans les modèles. Ainsi, Maxime Trebitsch, à Heidelberg, en Allemagne, prend en compte le transfert radiatif (la génération et la propagation des photons) dans de nouvelles simulations. À l'Institut d'astrophysique de Paris, Yohan Dubois fait des développements sur le rôle du champ magnétique et de la poussière. La nouvelle génération d'instruments, notamment le télescope spatial James-Webb (lancement prévu en 2021), va observer l'Univers lointain dans lequel le rôle de cette poussière sera primordial. Il s'agit également de préparer les campagnes d'observations du futur. Un domaine en innovation permanente. ■ P. P.

Les simulations numériques permettent-elles de décrire tout ce qu'on voit ?

Tout ? Non, loin de là. Mais il est possible de décrire beaucoup de choses et bien mieux qu'avant. Par exemple, on retrace la formation des galaxies spirales, les interactions entre les galaxies, leur collision, la formation des galaxies elliptiques, etc. Mais il manque la résolution à petite échelle, de sorte que, si les aspects gravitationnels sont bien maîtrisés, l'influence de la formation des étoiles, celle de la rétroaction due aux étoiles, de l'apport d'énergie quand une étoile explose (une supernova) ne sont pas accessibles directement dans les simulations. Bref, tout ce qui se passe à une échelle inférieure à la grille de résolution de la simulation nous échappe encore. Du coup, on a des « recettes » pour prendre ces phénomènes en compte, mais ce n'est pas entièrement compris et cela dépend du type de simulation.

Il faudrait améliorer les recettes, mieux comprendre ces ingrédients ?

Oui. Et faire varier beaucoup de paramètres. C'est là que l'apprentissage statistique, cette technique de l'intelligence artificielle en plein essor en astronomie, a du bon, parce que l'on peut construire des bibliothèques considérables. L'une des limites est qu'il y a énormément de

NEW HORIZON 2018 / Y. DUBOIS

“Un ensemble formidable de nouvelles données cosmologiques est attendu pour 2028”

variables, il faut donc une quantité colossale de simulations. Le temps de calcul en est une autre : pour les très grosses simulations cosmologiques, avec des milliards de particules, il n'est possible d'en réaliser qu'une par an typiquement ! Mais cela donne déjà de très beaux résultats, comme ceux du projet Horizon *[lire l'encadré p. 127]*.

Dans ces simulations, on doit mettre de la matière noire pour expliquer la dynamique. Pourtant, les astronomes ne savent toujours pas ce qu'est cette matière noire, ni la détecter, alors qu'elle est recherchée avec constance depuis des décennies. Cela peut-il remettre en question son existence ?

Pas forcément. Mais cela renforce le camp de ceux qui, afin de résoudre le problème, plaident pour une modification des lois de la gravité plutôt que pour l'existence d'une particule. En résumé, d'un côté, la matière noire froide expliquerait très bien les données cosmologiques, mais moins bien les données galactiques et, surtout, elle reste introuvable. De l'autre, la modification de la gravité, comme ce que propose la théorie Mond, expliquerait très bien les observations galactiques, mais pas celles de nature cosmologique. Avec le problème de la matière noire, l'astronomie vit une crise. Et nul ne peut dire d'où viendra la solution.

Outre ce questionnement sur la matière noire, comment voyez-vous l'évolution de l'astronomie dans les prochaines décennies ?

Je suis très impatiente de voir les résultats des grands observatoires qui sont prévus, notamment le James-Webb Space Telescope, successeur attendu du télescope spatial Hubble *[programmé pour être lancé en 2021, NDLR]*. Spécifiquement pour les galaxies, j'attends aussi beaucoup du satellite européen Euclid, qui devrait être lancé en 2022. Au lieu de faire des observations en champ profond sur de petites zones du ciel, comme l'a fait le télescope Hubble, Euclid va sonder les profondeurs du ciel sur l'intégralité de la voûte céleste. Ainsi, on va passer de 3 millions de galaxies pour lesquelles on a des informations précises à plus de 1 milliard ! Faire toutes ces observations prendra six ans à partir de sa mise en service. Donc, en 2028, si tout se passe bien, les astronomes disposeront d'un ensemble formidable de nouvelles données cosmologiques.

Qu'espère-t-on obtenir avec cette manne ?

On cherchera notamment à observer les caractéristiques d'un phénomène appelé « oscillations acoustiques baryoniques », qui permet de donner une échelle de distance à différents âges de l'Univers. Avec cette « règle cosmique », il sera possible de mesurer précisément le rayon de l'Univers, de déterminer quand l'expansion a commencé à s'accélérer – un phénomène mis en évidence en 1998 en comparant le décalage vers le rouge dû à l'expansion et la distance des supernovae de type Ia (*) *[qui vaudra à Saul Perlmutter, Adam Riess et Brian Schmidt le prix Nobel de physique*

(*) **Les supernovae de type Ia** résultent de l'explosion d'une étoile dans un système binaire. Leur luminosité permet de mesurer les distances extragalactiques.

ED ALCOCK / M.Y.O.P. 2020

en 2011, NDLR] –, de préciser à quel rythme elle s'est déroulée, etc. Cela va nous renseigner également sur la nature de l'énergie noire, qui est responsable de cette accélération : est-elle une constante cosmologique ? Est-ce qu'elle évolue dans le temps ? Cela fait partie des grands défis de l'astrophysique : tout ce qui concerne le « secteur noir » : matière noire, énergie noire et même trous noirs qui se trouvent au cœur des galaxies notamment. Tout cela peut avoir beaucoup d'impact sur la physique fondamentale. Notamment dans le nouveau domaine de la gravité quantique, parce que la vraie nature de la gravité dans le domaine quantique n'est toujours pas connue. Et donc cela intéresse les physiciens, pas seulement les astronomes.

Bien que vous soyez théoricienne, vous avez également fait des observations. Dans quel domaine ?

En effet, je ne suis pas uniquement rivée sur mon écran d'ordinateur ou ma feuille de papier, j'ai aussi pas mal observé, en particulier dans le domaine millimétrique, et cela dès le début de ma carrière. Pourquoi le millimétrique ? Car c'est dans ce domaine de longueurs d'onde qu'émettent les objets froids de l'Univers, ce qui permet de cartographier le gaz moléculaire, comme le monoxyde de carbone (CO) qui trace l'hydrogène moléculaire (H_2), l'élément le plus abondant de l'Univers. C'est une manière d'étudier les nuages moléculaires, qui sont des lieux de formation d'étoiles dans les galaxies. Par ailleurs, dans certaines régions, comme le centre de notre Galaxie, l'hydrogène atomique se combine et il reste uniquement des molécules H_2. Ainsi, près du centre galactique, la plus grande partie du gaz qui nourrit le trou noir qui s'y trouve est moléculaire. Pour étudier à quel taux ce trou noir est nourri, comment et pourquoi il croît, les observations millimétriques sont essentielles.

Où se font ces observations ?

Avant 1985, nous les faisions aux États-Unis, et puis sont arrivés l'Institut de radioastronomie millimétrique (Iram), avec d'abord les 6 antennes de l'interféromètre du plateau de Bure, dans les Hautes-Alpes, et l'antenne de 30 m du Pico Veleta, dans la Sierra Nevada, en Espagne ; ces deux instruments sont restés longtemps les meilleurs instruments au monde. Actuellement, pour l'hémisphère Sud, il y a l'interféromètre Alma (66 antennes), qui se trouve sur le plateau d'Atacama, au Chili, à plus de 5 000 m d'altitude, et, pour l'hémisphère Nord, l'instrument Noema (acronyme de « Northern Extended Millimeter Array »), extension de l'interféromètre du plateau de Bure avec 6 nouvelles antennes (12 en tout). Si vous voulez observer la galaxie d'Andromède, il n'y a que Noema – puisque cet amas d'étoiles se situe dans l'hémisphère Nord céleste. Enfin, dans le domaine radio basses fréquences, il y a le projet de radiotélescope géant SKA, en construction en Afrique du Sud et en Australie, dont on attend beaucoup. Sa mise en service est prévue pour le moment en 2028 *[lire* La Recherche *n° 555, janvier 2020, p. 4]*.

Avez-vous une galaxie ou un objet préféré dans le ciel ?

Oui, j'aime particulièrement la galaxie d'Andromède. Nous avons beaucoup travaillé sur cette galaxie et c'est là que notre équipe a détecté les premières molécules de monoxyde de carbone à la fin des années 1970, alors que les équipes américaines ne les avaient pas vues. Plus récemment, nous avons étudié son centre en infrarouge, avec le télescope spatial Spitzer, et nous y avons trouvé des anneaux. Longtemps, les astronomes se sont battus pour savoir si Andromède était une galaxie avec des bras spiraux ou pas. Et, en effet, Andromède est connue pour avoir un anneau externe. Mais nos images, faites avec Spitzer, ont révélé de la poussière d'un deuxième anneau, plus interne ; celui-ci n'est pas tout à fait circulaire et il se trouve décalé par rapport au centre (4). Les simulations que nous avons effectuées à partir de ces observations montrent qu'une collision frontale avec la galaxie M32 voisine, qui s'est déroulée il y a 210 millions d'années, excite deux ondes de densité qui correspondent à ces anneaux. C'est un magnifique exemple du rôle que peut jouer la dynamique gravitationnelle sur l'aspect galactique. ■

Propos recueillis par Philippe Pajot

(1) K. Sheth *et al., ApJ, 675,* 1141, 2008.
(2) W. L. Peters III, *ApJ, 195,* 617, 1975.
(3) C. C. Lin et F. H. Shu, *ApJ, 140,* 646, 1964.
(4) D. L. Block *et al., Nature, 443,* 832, 2006.

▲ *Située à 2 millions d'années-lumière de nous, notre voisine Andromède est l'une des préférées de Françoise Combes. Il s'agit d'une galaxie au passé beaucoup plus agité que celui de la Voie lactée (ici, vue en infrarouge).*

NASA/ESA/HERSCHEL/PACS/SPIRE/J. FRITZ, U. GENT; X-RA

Archéologie

La Fabuleuse Histoire de l'invention de l'écriture

Silvia Ferrara

Professeure de philologie mycénienne à l'université de Bologne, en Italie, Silvia Ferrara nous conduit, à travers l'espace et le temps, à la découverte des multiples inventions de l'écriture.

L'écriture n'a pas été inventée en une seule fois ni un seul lieu. L'actualité récente en a encore apporté la preuve, qui a vu le magazine *Sciences et Avenir* révéler en exclusivité qu'un archéologue français, François Desset, avait déchiffré des inscriptions en élamite linéaire, une écriture utilisée en Iran il y a plus de 4 000 ans. Mais les spécialistes ne savent pas combien de fois exactement elle est apparue dans l'histoire du monde. Quatre, c'est presque certain. Plus ? Peut-être. Et comment ces inventions distinctes ont-elles été rendues possibles, sur les plans cognitif, linguistique et culturel ? Voilà précisément ce que cherche à découvrir Silvia Ferrara ; avec son groupe de recherche, cette professeure de philologie mycénienne à l'université de Bologne, en Italie, a mis au point une méthode d'analyse à la croisée de différentes disciplines. Elle a aussi établi des stratégies de déchiffrage sur différentes écritures. Un travail que l'on retrouve dans cet ouvrage enlevé, qui se lit comme un bon roman d'aventures.

Prenant et surprenant, le récit débute dans les îles de la mer Égée. Première escale : la Crète, berceau de quatre des plus anciens systèmes d'écriture connus au monde, dont trois n'ont pas encore été déchiffrés (le crétois hiéroglyphique, le linéaire A et le disque de Phaïstos). Puis cap vers Chypre. L'odyssée nous emmène ensuite sur l'île de Pâques, où le rongorongo – le système d'écriture local – a tout du casse-tête ! Silvia Ferrara nous promène ainsi un peu partout sur la planète, à différentes époques. Jusqu'à nous faire découvrir des systèmes d'écriture inventés de manière solitaire, comme la *lingua ignota* de la théologienne Hildegarde de Bingen au XIIe siècle, encore indéchiffrés comme le manuscrit de Voynich au XVe siècle, sous-tendus par une mission idéologique, comme le pahawh hmong en 1959, ou encore des « rameaux isolés » (systèmes graphiques renfermés sur eux-mêmes et illisibles, comme les quipus incas), des inventions sociales, etc. Le lecteur plonge également dans la recherche scientifique, qu'elle soit actuelle – description de méthodes de numérisation 3D et utilisation de techniques d'intelligence artificielle – ou ancienne (retour sur la contribution décisive d'Alice Kober dans le déchiffrement du linéaire B).

La philologue étudie le lien entre naissance des États et écriture, ou entre écriture et langage. L'avènement de l'écriture n'était, selon elle, pas inévitable, la preuve étant que l'humanité s'en est passée pendant très longtemps ; celle-ci ne serait que le prolongement naturel d'un certain nombre d'inventions humaines, telles que l'art ou les icônes, et n'aurait aucune finalité précise si ce n'est celle de *« donne[r] des noms, à nous et à ce qui nous entoure, et [de] les conserve[r] »*.

Mais tous ces handicaps ne sont pourtant rien à côté des évolutions qu'elle a permises. *« L'écriture a changé chacun de nous, de l'intérieur »*, s'enthousiasme l'auteure. Puis, plus loin : « *Nos neurones ont appris à recycler des zones destinées à capter autre chose et s'en sont servis pour capturer des signes.* […] *Vous lisez des mots et des phrases, vous ne remarquez même pas la vitesse à laquelle vous le faites, la rapidité du "traitement" de l'écrit.* » Là se situe la magie – imparfaite – de l'écriture, et toute sa beauté, que ce livre restitue avec brio. **Vincent Glavieux**

Silvia Ferrara, *Seuil, janvier 2021, 320 p., 22 €.*

DR

Ornithologie

Oiseaux

Jonathan Elphick a tenu pendant son enfance un carnet de croquis où il consignait maladroitement les oiseaux qu'il observait dans la campagne du pays de Galles. Adulte, cet ornithologue britannique eut la possibilité d'accompagner à distance respectueuse le grand artiste naturaliste Charles Tunnicliffe (1901-1979) sur l'île d'Anglesey, dont les marais et les lacs abritent de nombreuses espèces. Ne cessant de concilier sa curiosité pour l'ornithologie et la peinture, il a eu l'opportunité de plonger dans les collections d'œuvres d'art du Musée d'histoire naturelle de Londres.

Grâce à ce fonds exceptionnel, il retrace dans ce livre l'histoire de l'art ornithologique à travers les siècles, des premières chouettes stylisées retrouvées dans la grotte Chauvet, en Ardèche, jusqu'aux peintures et illustrations du XXe siècle. Au fil d'un texte très documenté, il présente à la fois une histoire de l'estampe, des techniques picturales, et une chronologie de l'observation animale à travers les expéditions naturalistes et coloniales. L'auteur nous fait ainsi sentir le rapport étroit qui unit la figuration des oiseaux et la classification des espèces. Il nous révèle le cheminement d'artistes inspirés comme William MacGillivray (1796-1852) – auquel on doit la dernière représentation du Grand Pingouin, *Pinguinus impennis,* une espèce qui vivait le long des côtes de l'Atlantique nord et a été réduite à néant par la chasse. On découvre aussi des aquarelles plus actuelles, comme le rondouillet *Strigops kakapo*, ce perroquet de Nouvelle-Zélande incapable de voler, saisi par les pinceaux de l'artiste contemporaine Angela Gladwell. Un plaisir esthétique qui réveille la fibre naturaliste et écologique du lecteur!

M. G.

Jonathan Elphick, *Delachaux et Niestlé, novembre 2020, 375 p., 39,90 €.*

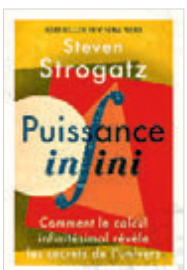
HEATHER SKYE PHOTOGRAPHY

Mathématiques

Puissance infini

Steven Strogatz

Le mathématicien Steven Strogatz s'attache à montrer que l'infini est un outil de simplification indispensable à la science et à la compréhension de la nature.



C'est une histoire du calcul qui fait intervenir l'infiniment petit et le passage à la limite que nous raconte le mathématicien américain Steven Strogatz, spécialiste des réseaux complexes et vulgarisateur de talent. Et si d'aventure le calcul infinitésimal n'avait aucun intérêt pour vous, vous auriez tort! Car, sans ses outils mathématiques, la science et la technologie modernes n'auraient pas pu exister: pas d'ordinateur, pas d'imagerie médicale, ni d'exploration spatiale… Après les intuitions et les idées d'Archimède, le lecteur traverse les siècles jusqu'à découvrir la formalisation de la théorie par deux hommes: l'Anglais Isaac Newton et l'Allemand Gottfried Wilhelm Leibniz au début du XVIIIe siècle. Ce sont eux qui, à travers leurs travaux, montrent comment découper jusqu'à l'infini – le calcul différentiel – et réassembler ensuite les parties – le calcul intégral. Une simplification grâce à l'infini en quelque sorte! Et, de fait, tous les phénomènes de la nature, des ondes électromagnétiques aux ondes gravitationnelles récemment détectées, s'expriment en termes d'équations différentielles (ou équations aux dérivées partielles lorsque plusieurs variables sont en jeu). Un livre riche, dont les explications mathématiques très abordables permettront de saisir la *« déraisonnable efficacité des mathématiques »*. **Philippe Pajot**

Steven Strogatz, *Quanto, novembre 2020, 464 p., 24,50 €.*

Alimentation

Manger au temps du coronavirus

À partir de 773 contributions émanant de consommateurs, d'agriculteurs, de bénévoles d'associations, etc., le collectif à l'origine de ce livre (dont des chercheurs de l'Inrae) montre en quoi le confinement a affecté nos comportements en termes d'alimentation: comment il a provoqué des détresses alimentaires chez les personnes âgées ou fragiles, conduit à la mise en place d'actions de solidarité, poussé les agriculteurs à se réinventer dans l'urgence, permis à tous de (re)découvrir les circuits courts ou, à l'inverse, conduit certains à (re)prendre le chemin des grandes surfaces pour faire leurs courses. L'enquête met aussi parfaitement en évidence les vulnérabilités de nos systèmes alimentaires, et propose un certain nombre de recommandations intéressantes pour les résorber. **V. G.**

Yuna Chiffoleau, Catherine Darrot et Gilles Maréchal (dir.), *Apogée, novembre 2020, 168 p., 15 €.*

Biologie

Les Vies minuscules d'Édouard Chatton

Catherine Jessus et Vincent Laudet ravivent la mémoire du biologiste Édouard Chatton, un fabuleux explorateur des vies microscopiques et océaniques.

Édouard Chatton est un biologiste et un artiste passionné par les êtres microscopiques qui peuplent les océans. Il se penche notamment sur des organismes unicellulaires dotés d'un noyau, les protistes, apparus sur Terre il y a plus de 1 milliard d'années. S'il était encore en vie, il se serait certainement embarqué sur la goélette *Tara* pour explorer les planctons du monde entier ! Né en 1883, ce savant d'origine franco-suisse est terrassé par un accident vasculaire cérébral au lendemain de la Seconde Guerre mondiale. Il aurait pu doucement tomber dans l'oubli si l'éclat et la qualité de ses dessins scientifiques, de grandes planches murales de 1,60 sur 1,10 m, n'avaient attiré l'œil admiratif de Catherine Jessus, directrice de recherche au CNRS, et Vincent Laudet, professeur de biologie marine à l'Institut des sciences et technologies d'Okinawa, au Japon : *« Originales, colorées, furieusement esthétiques, elles représentent une foultitude d'êtres microscopiques marins* [...] *dont les structures étranges et énigmatiques sont illustrées avec un luxe de détails. »*

Les deux scientifiques ont donc décidé de les rassembler dans un livre, accompagnées de la biographie de l'artiste. Passé par l'Institut Pasteur de Paris et de Tunis, puis par les universités de Strasbourg et Montpellier, avant de diriger la station de biologie marine de Banyuls-sur-Mer, cet insatiable curieux a été le mentor d'André Lwoff, Prix Nobel en 1965. Pour bien prendre la mesure de ses recherches, les auteurs ajoutent un panorama actualisé et instructif sur la biologie des protistes : on comprend à quel point ils sont indispensables aux grands cycles de la matière et de l'énergie, comme le carbone et l'oxygène.
Conçu pour les passionnés d'art et de biologie, cet ouvrage rend aussi hommage à l'esprit de synthèse d'Édouard Chatton, qui lui permettait de tirer des règles générales de son sujet. C'est alors qu'on se rend compte qu'on a tous croisé ce scientifique sans le savoir, car c'est lui qui a dégagé et nommé, en 1925, les deux catégories du vivant enseignées aujourd'hui à tous les collégiens, à savoir les eucaryotes – les êtres dont les cellules contiennent un noyau (animaux, plantes, protistes...) – et les procaryotes – les êtres dénués de noyau (bactéries, archées...). Édouard Chatton, une vie pas si minuscule que ça, donc. Mathias Germain

Catherine Jessus et Vincent Laudet, *CNRS Éditions, novembre 2020, 284 p., 29 €.*

Philosophie

Les Lumières à l'âge du vivant

Il est temps de faire naître un nouvel imaginaire ! Cet appel de la philosophe Corine Pelluchon part d'un constat : *« Notre époque se caractérise par un combat virulent mené contre* [les Lumières], *comme en témoignent les partis nationalistes, mais aussi la haine de la raison, le rejet de l'universalisme et la tentation d'organiser la société en insistant sur ce qui sépare les êtres humains, et non sur ce qui leur est commun* [...], *la perte de sens et la démission des États face à l'ordre économiste du monde,* [...] *le relativisme et le mépris des institutions démocratiques. »* Face à cet état des lieux peu réjouissant, l'intellectuelle refuse de se laisser abattre et engage donc une réflexion philosophique salutaire. Sa proposition ? En revenir à l'attitude des Lumières – s'interroger de manière critique sur son époque – tout en la réactualisant. Car si les notions d'universalisme, d'émancipation individuelle et collective, de liberté, d'égalité, de progrès ou encore de paix, défendues au XVIIIe siècle, restent cardinales, elles doivent être repensées à l'aune des défis d'aujourd'hui.

Les nouvelles Lumières, selon Corine Pelluchon, doivent ainsi être écologiques. Elles nécessitent *« la prise de conscience de notre vulnérabilité et une ouverture à l'altérité rendant possible une plus sage habitation de la Terre et une plus juste cohabitation avec les autres vivants »,* en particulier les animaux. Elles supposent aussi que nous retrouvions un rapport raisonné aux innovations technologiques ; celles-ci doivent, comme aux XIXe et XXe siècles, être guidées par la recherche du bien commun, subordonnées à la concrétisation d'un projet d'émancipation individuelle et collective, et non tournées contre l'humain. **V. G.**

Corine Pelluchon, *Seuil, janvier 2021, 336 p., 23 €.*

Bioacoustique

Les Animaux parlent

Connaissez-vous la bioacoustique ? Il s'agit de la science qui étudie les communications acoustiques animales. Elle a pour objectifs de décrypter la façon dont les animaux produisent et entendent des sons, quelles informations sont codées dans leurs signaux sonores, comment les systèmes de communication acoustique se sont mis en place au cours de l'histoire du vivant, etc. C'est une discipline récente : son essor date des années 1960. En un peu plus de 500 pages, ce livre, écrit par l'un des grands noms du domaine en France, Nicolas Mathevon, nous offre un aperçu aussi didactique que détaillé de la recherche actuelle dans le domaine.
Les études qu'il relate s'intéressent à une grande variété d'animaux. La paruline à sourcils blancs, par exemple ; cette fauvette vit dans une forêt tropicale du Brésil, la Mata Atlântica, où son chant (et les informations qu'il véhicule) est parfaitement adapté au dense couvert forestier. Il y a aussi les morses de l'Arctique ; chez ces pinnipèdes, la reconnaissance vocale entre parents et jeunes fonctionne à plein. Ou bien encore les cachalots, qui émettent des sons simples et courts, mais extrêmement puissants – 236 décibels ! – pour localiser et peut-être même étourdir leurs proies. Et que dire des cerfs, dont le brame est certes une prouesse vocale… mais fondée sur une tricherie.
Le confinement du printemps 2020 a été, pour nombre d'entre nous, l'occasion de prêter l'oreille aux bruits des animaux. Voilà un livre parfait pour ceux qui souhaitent approfondir le sujet. Un site Internet vient en complément de l'ouvrage ; y sont disponibles des enregistrements sonores, des films et des dessins inédits. Laissez-vous emporter par la musique exubérante du monde sauvage. **V. G.**

Nicolas Mathevon, *humenSciences, janvier 2021, 512 p., 20 €.*

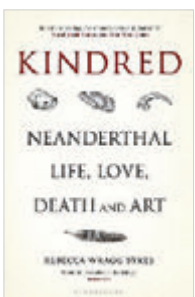
DR

LU D'AILLEURS Paléoanthropologie

Kindred

Rebecca Wragg Sykes

L'archéologue britannique brosse un portrait exhaustif de Neandertal, enterrant tous les clichés sur une espèce longtemps considérée comme inférieure à la nôtre.



Des brutes épaisses armées d'un gourdin et cheminant au hasard dans un paysage désertique. Aujourd'hui encore, les clichés sur les Néandertaliens ont la vie dure. Avec son livre, l'archéologue britannique Rebecca Wragg Sykes, spécialiste de ces hominidés, veut balayer définitivement les fausses idées sur nos lointains ancêtres. S'appuyant sur l'ensemble des travaux scientifiques publiés sur le sujet, depuis la découverte du premier homme de Neandertal en 1856 en Allemagne, elle dresse un portrait extrêmement complet – le mieux documenté à ce jour – et vivant – on est littéralement plongé à leurs côtés –, qui révèle toute l'ingéniosité technique, la complexité sociale et l'adaptabilité à leur environnement des Néandertaliens.
Ce n'est qu'au cours de ces trente dernières années, note l'auteur, que l'image de Neandertal a changé : l'accumulation des ossements, outils et autres artefacts, et surtout leur analyse poussée grâce aux techniques de génétique, d'imagerie microscopique et de datation, ont permis de révéler précisément qui était notre ancêtre. On sait ainsi qu'il a vécu sur une très longue période de temps – 350 000 ans –, sur un vaste territoire – en Eurasie –, et dans de multiples environnements (toundra, steppe, forêts, littoral). Son régime alimentaire était varié, des mammouths, chevaux ou encore dauphins qu'il chassait, jusqu'aux graines et fruits qu'il cueillait. On sait aussi qu'il savait fabriquer des outils complexes, des vêtements, des abris confortables, qu'il enterrait ses morts et qu'il était capable d'une certaine forme d'art.
On peut vraiment parler de success-story. Et c'est là le point central du livre, qui nous force à repenser la place de notre espèce dans l'évolution : tous les attributs – planification, coopération, altruisme, imagination, sens de l'esthétique… – qu'on pensait jusqu'ici être l'apanage *d'Homo sapiens* étaient aussi présents chez Neandertal. L'auteur nous invite ainsi à voir quel héritage commun nous partageons avec d'autres espèces. De cette manière seulement, nous pourrons mieux comprendre ce qui définit l'humanité.
L'archéologue nous met toutefois en garde : la disparition brutale de Neandertal, il y a 40 000 ans, pourrait bien présager notre propre fin, dans un monde marqué de notre empreinte et plus hostile que jamais.

Julien Bourdet, journaliste scientifique

Rebecca Wragg Sykes, *Bloomsbury Sigma, août 2020, 400 p., £ 20.*

L'hydrogène en France : une filière prometteuse… dans trente ans

L'impératif de décarbonation de notre économie impose de tirer parti de toutes les technologies disponibles et de mettre en place des politiques publiques à même d'assurer leur déploiement. Dans ce cadre, *« l'hydrogène est devenu la rockstar des nouvelles énergies »* : en juillet 2020, Frans Timmermans, premier vice-président exécutif de la Commission européenne, chargé du Pacte vert pour l'Europe, communiquait par ces mots son enthousiasme à l'égard de ce vecteur énergétique. L'Allemagne a décidé d'y consacrer 9 milliards d'euros de son plan de relance, la France a prévu d'y injecter 7 milliards d'euros d'ici à 2030 de soutien public – subventions, aides, soutien à l'investissement – vers l'industrie, la mobilité, et la recherche et développement, et l'Europe lance une stratégie ambitieuse de déploiement. Comment interpréter cet élan donné à la filière ? Dans le cadre de la transition énergétique, l'hydrogène présente plusieurs atouts : il est abondant à la surface terrestre ; il se stocke ; l'eau est le seul produit de sa combustion ; il n'émet donc pas directement de gaz à effet de serre (GES), responsables du réchauffement climatique.

Si cela en fait un bon vecteur énergétique, ses conditions actuelles de production ne sont pas compatibles avec nos objectifs climatiques : 95 % de l'hydrogène français est aujourd'hui obtenu à partir d'énergies fossiles – extraction chimique classique à partir de méthane (CH_4) et de charbon notamment. Toutefois, il existe plusieurs manières de le produire de manière décarbonée, l'électrolyse étant la plus prometteuse. Cette technologie utilise un courant électrique pour décomposer l'eau en dioxygène (O_2) et en dihydrogène (H_2). Encore faut-il que l'électricité utilisée ne résulte pas de la mobilisation d'énergies fossiles. Si en France, à ce jour, 93 % de l'électricité produite est décarbonée – en raison du parc nucléaire important – et qu'elle le reste, la solution peut être bénéfique d'un point de vue climatique. L'hydrogène peut aussi être produit par gazéification de la biomasse agricole. Le captage du carbone émis par les procédés classiques, émetteurs de gaz à effet de serre, peut également être considéré comme un mode de production d'hydrogène bas carbone.

L'hydrogène représente par ailleurs une solution intéressante pour remplacer les énergies fossiles dans certains secteurs. Dans le domaine de la mobilité, les transports lourds et réguliers tels que les bus, les trains et les poids lourds seraient de bons candidats. En effet, la logistique de l'approvisionnement peut être optimisée, permettant des économies d'échelle. Outre cela, un réservoir d'hydrogène se recharge en quelques minutes, ce qui représente un autre atout, en particulier par rapport aux batteries des véhicules électriques. En revanche, pour la mobilité individuelle, il faut être plus nuancé. Le coût des infrastructures – 1 million d'euros par borne de recharge, par exemple – plaide pour en éviter les usages diffus.

DES INFRASTRUCTURES DE TRANSPORT À MODIFIER

Les filières industrielles produisant de l'ammoniac, des engrais, le raffinage pétrolier et la métallurgie, eux, peuvent y trouver un moyen d'améliorer leur empreinte environnementale. En effet, ils utilisent actuellement

THIERRY MARRO

de l'hydrogène dont une partie est produite par extraction à partir d'hydrocarbures, autrement dit des énergies fossiles. Ces consommations industrielles représentent 2 à 3 % des émissions françaises de GES.
De plus, sous réserve de respecter des contraintes techniques et de sécurité, l'hydrogène peut être injecté dans les réseaux gaziers, aujourd'hui jusqu'à 6 à 20 % en volume (correspondant à 2 à 7 % en énergie). Dépasser cette teneur par rapport au méthane supposera une transformation importante des infrastructures de transport de gaz, avec les coûts associés. En effet, mélanger de l'hydrogène au gaz naturel modifie la résistance des matériaux utilisés pour le stockage, le transport, la distribution et l'utilisation du gaz naturel, ce qui impose de maîtriser de nouveaux risques. Dans le domaine des énergies renouvelables, l'hydrogène est également évoqué comme une solution dite « de flexibilité » pour le stockage d'énergie électrique. Les surplus d'électricité produits par les panneaux solaires ou les éoliennes – lors d'épisodes de vent fort et de faible demande, par exemple – pourraient être utilisés pour produire de l'hydrogène par électrolyse. Ce dernier serait ensuite converti en électricité lorsque la situation s'inverse.

La donne pourra changer si la France opte pour un mix énergétique intégralement ou majoritairement renouvelable

ENGAGER UNE RÉFLEXION SUR LES COÛTS

Toutes ces perspectives se heurtent cependant à des problèmes de rendement et de coût. Suivant la technologie de stockage utilisée, seule 25 à 35 % de l'électricité injectée au départ est restituée sous cette forme. Pour ces deux raisons, le stockage sous forme d'hydrogène de l'électricité produite par les énergies renouvelables n'est pas compétitif à moyen terme au regard des alternatives existantes (pilotage de la demande, batteries, modernisation des réseaux d'électricité…). À l'horizon 2035, le coût des électrolyseurs est, dans les configurations les plus favorables, estimé comme étant trois fois plus élevé que ce que les marchés susceptibles de valoriser cette solution sont prêts à payer. Et ce alors que les techniques concurrentes devraient elles aussi progresser (1). Dans l'industrie également, produire de l'hydrogène par électrolyse reste plus coûteux que d'utiliser les procédés chimiques classiques à partir d'hydrocarbures. L'opérateur Réseau de transport d'électricité (RTE) projette qu'à l'horizon 2035, l'hydrogène décarboné restera 1,5 à 5 fois plus coûteux que l'hydrogène produit par vaporeformage. Une fiscalité carbone telle que celle en vigueur actuellement en Europe (marché de quotas) ne compense pas les différentiels de prix de revient.
À court et moyen terme, si l'Europe (et la France en particulier) veut pousser l'utilisation de l'hydrogène, il convient donc, d'une part, de s'assurer que ce sont les usages les plus pertinents qui seront convertis à ce vecteur et que les modes de production seront optimisés d'un point de vue économique. D'autre part, il faut veiller à ce que les politiques publiques jouent bien un rôle essentiel pour favoriser cette transition, dans un domaine où être pionnier confère un avantage décisif vis-à-vis de la concurrence.
Il faudra aussi tenir compte des complémentarités avec les systèmes électriques des États voisins. Le bénéfice climatique et l'intérêt économique de l'hydrogène s'évaluent à la maille européenne du fait de l'interconnexion de pays aux bouquets énergétiques très différents, souvent plus carbonés que le nôtre. Sortir des énergies fossiles en Europe est un préalable : il serait dommageable de développer l'hydrogène tout en équilibrant le système par des moyens polluants hors de nos frontières.
L'hydrogène trouve un espace favorable lorsque les moyens décarbonés deviennent abondants et dépassent la consommation.
À l'horizon 2050, le besoin de stocker les surplus d'électricité éolienne ou solaire sera alors bien plus important et mieux valorisé. L'hydrogène pourrait devenir un moyen de stockage saisonnier, pour assurer l'adéquation entre l'offre et la demande d'électricité sur des échelles de temps relativement longues.
Au-delà d'un projet spécifique à la filière, il faudra cependant lui donner plus de visibilité en précisant le mix énergétique susceptible de satisfaire ses besoins et conditionnant sa compétitivité. La réglementation des véhicules – tant d'un point de vue européen que national ou local – et la commande publique sont également des outils à même de faire pencher la balance en faveur de l'hydrogène, là où cela est nécessaire. Enfin, pour préserver les industries réalisant un effort de décarbonation, une taxation différenciée, sur le territoire intra-européen et aux frontières de l'Union, serait utile. Tout cela suppose une intégration accrue des stratégies nationales, à ce jour trop limitée. ■

(1) RTE, « La transition vers un hydrogène bas carbone. Atouts et enjeux pour le système électrique à l'horizon 2030-2035 », janvier 2020. https://assets.rte-france.com/prod/public/2020-07/rapport%20hydrogene.pdf

Marie Dégremont est chercheuse associée au Centre de sociologie des organisations à l'Institut d'études politiques de Paris.

NUMÉRIQUE ET IA

La chronique de Chloé Clavel

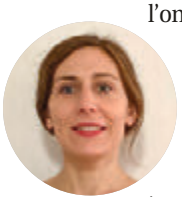
Rendre l'intelligence artificielle conversationnelle plus « humaine »

Ces dernières années ont vu une accélération du développement des intelligences artificielles (IA) conversationnelles, telles qu'Alexa d'Amazon, Siri d'Apple ou Google Home. Des robots compagnons comme Pepper, robot humanoïde développé par la société japonaise Softbank Robotics, accueillent des visiteurs dans de nombreuses entreprises à travers le monde ou assistent les personnes âgées, et des agents conversationnels *(chatbots)* sont opérationnels dans la plupart des services de relation clients des entreprises. Si ces outils conversationnels sont déjà répandus, la mise au point d'une IA socialement intelligente reste un enjeu de taille pour augmenter la confiance qu'un utilisateur pourrait avoir dans ces assistants d'un nouveau type. Avec cet objectif en vue, les chercheurs de ces domaines travaillent non seulement sur les aspects techniques de l'intelligence artificielle que sont l'apprentissage profond supervisé ou semi-supervisé, mais aussi sur la modélisation des connaissances issues des sciences humaines et sociales (SHS), ceci afin de mettre au point des IA plus « humaines ». Les théories élaborées dans le domaine de la sociologie, de la psychologie et de la linguistique aident ainsi à mieux identifier ces comportements pertinents qu'il faut prédire dans une interaction humain-robot ; ces théories renseignent aussi sur les indices (linguistiques, acoustiques et visuels) qui autorisent une analyse plus poussée de la manière dont l'interaction avec une IA fonctionne. Toutefois, l'interdisciplinarité est souvent rendue difficile par les différences de paradigmes et d'objectifs inhérents aux deux disciplines. Un chercheur en apprentissage automatique a recours à de vastes bases de données permettant l'apprentissage d'une caractéristique stable utile pour modéliser les classes de comportements socio-émotionnels qui doivent être détectables. À l'inverse, un chercheur en SHS fait généralement appel à un nombre limité de données d'interaction, permettant des analyses qualitatives afin de faire ressortir leur singularité et leur caractère circonstanciel (1). Reste que la majorité des recherches actuelles autour des IA conversationnelles ont recours aux méthodes d'apprentissage profond, connues pour leur opacité : nous comprenons mal la façon dont l'algorithme « apprend », c'est-à-dire les représentations intermédiaires ainsi que les règles implicites de décision apprises par les différentes couches des réseaux neuronaux sur un grand nombre de données. Cette opacité retarde l'utilisation de ces IA conversationnelles dans des secteurs tels que la santé, l'éducation ou les ressources humaines, où la transparence est un présupposé indispensable.

Émotions, attitudes, préférences… des phénomènes à mieux circonscrire grâce aux sciences humaines et sociales

Comment mieux comprendre ce que font les réseaux de neurones ? Pour le savoir, nous avons mené des travaux portant sur l'analyse automatique d'entretiens d'embauche préenregistrés et évalués par des recruteurs. Nous avons proposé une méthode pour appréhender les mécanismes d'attention mis en œuvre au sein des différentes couches d'un réseau de neurones artificiels. Le décryptage des mécanismes d'attention temporelle nous a permis d'identifier les moments de l'entretien

importants pour le réseau *(attention slices)*, lorsqu'il apprend à prédire ce qu'est un « bon » candidat pour les recruteurs. Des méthodes d'analyse nous ont ensuite permis de caractériser leur contenu en termes de signaux sociaux (pincement de lèvres, tics de langage, hésitations, etc.) (2). Ce besoin de transparence est très important dans le cas des modèles de comportements socio-émotionnels, car les méthodes d'apprentissage supervisé s'appuient sur des annotations humaines, par essence subjectives. En effet, la perception du comportement socio-émotionnel d'un individu varie d'une personne à l'autre. Or les méthodes d'apprentissage supervisé s'appuient sur ces perceptions humaines vues par les programmateurs pour l'entraînement de leurs modèles. Rappelons en effet que, pour apprendre à reconnaître une émotion précise, le modèle doit être préalablement entraîné à reconnaître cette émotion, qui aura été annotée par un humain. Les modèles qui en découlent, autorisant la prédiction du comportement socio-émotionnel, sont donc biaisés, car ils sont influencés par ces annotations.



Afin de réduire ce biais, la communauté des chercheurs en informatique émotionnelle *(affective computing)* s'appuie sur des travaux issus des SHS. Ces travaux nous aident à mieux circonscrire les phénomènes (émotions, attitudes sociales, personnalité, engagement de l'utilisateur, préférences) que l'on cherche à analyser automatiquement. Par ailleurs, nous tentons aussi de mieux identifier les biais d'annotation et ainsi de mieux définir la supervision des modèles d'apprentissage automatique. Il nous reste cependant à trouver de nouvelles façons d'entremêler SHS et apprentissage profond, de manière à continuer d'améliorer conjointement performance et transparence des modèles appris. ■

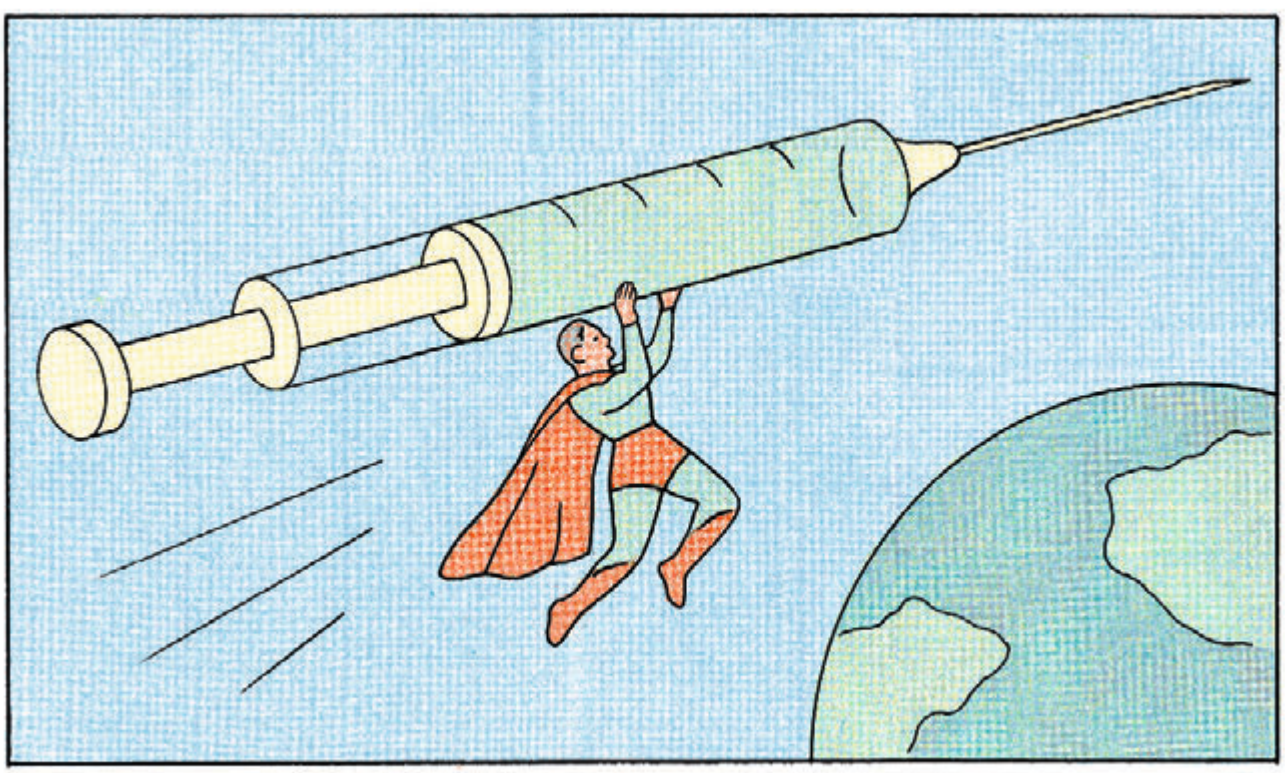
(1) N. Rollet, C. Clavel, *Interaction Studies, 21,* 268, 2020.

(2) L. Hemamou *et al.,* 8th International Conference on Affective Computing and Intelligent Interaction, doi:10.1109/ACII.2019.8925439, 2019.

Chloé Clavel est professeure dans le domaine de l'informatique émotionnelle, enseignante-chercheuse à Télécom Paris.

LA CHRONIQUE DESSINÉE

Par Alain Pilon



DR

ÉTHIQUE

La chronique de Jean-Gabriel Ganascia

Les libertés académiques, au-delà de la liberté d'expression

Au cours de l'automne 2020, le Sénat a voté quelques amendements au projet de loi de programmation de la recherche, dont l'un portait sur les libertés académiques : il y introduisait une référence aux valeurs de la République – en particulier la laïcité –, vues comme le socle de ces libertés, ce qui fit couler beaucoup d'encre. Quoique cette proposition ait été retirée et que nous ne souhaitions pas polémiquer sur ce point ici, profitons-en tout de même pour discuter de ce que sont les libertés académiques et de ce qui les met en péril aujourd'hui.

En France, la loi les garantit comme suit : « *Les enseignants-chercheurs, les enseignants et les chercheurs jouissent d'une pleine indépendance et d'une entière liberté d'expression dans l'exercice de leurs fonctions d'enseignement et de leurs activités de recherche, sous les réserves que leur imposent, conformément aux traditions universitaires et aux dispositions du présent code, les principes de tolérance et d'objectivité.* (1) » C'est cet article que l'un des amendements du Sénat escomptait compléter. Or, tout en procurant aux universitaires des droits spécifiques, cet article énonce déjà un certain nombre de restrictions à ces droits. Seuls les enseignants-chercheurs et les chercheurs en bénéficient, ce qui exclut de facto tous les autres personnels participant à la communauté universitaire : ingénieurs, techniciens, administratifs et étudiants. De plus, ces libertés sont soumises aux réserves qu'imposent les principes de tolérance et d'objectivité. Enfin, alors que, dans une démocratie parlementaire moderne, la constitution garantit à tous et à toutes les libertés fondamentales, dont la protection de la personne et la liberté d'expression, il pourrait sembler superfétatoire, voire contradictoire, de préciser dans le code de l'éducation que les enseignants-chercheurs et les chercheurs jouissent d'une indépendance d'esprit et d'une liberté de parole particulières dans l'exercice de leurs fonctions, tout en soumettant cette indépendance et cette liberté à un certain nombre de restrictions. Par-delà ces dimensions juridiques, il y va de la vocation de l'université en matière de transmission et d'approfondissement des connaissances : tant l'enseignement des savoirs existants que la quête d'idées nouvelles exigent indépendance d'esprit et liberté de parole.

PIERRE KITMACHER

Ces droits ont été conquis de haute lutte. À l'origine de l'université, qui remonte au Moyen Âge, les lettrés durent s'affranchir du joug de l'Église et des pouvoirs ecclésiastiques pour relire et discuter sans contraintes les textes anciens, confronter les diverses interprétations et en proposer d'autres. Plus tard, à la fin du XVIIIe siècle, lorsque la Révolution supprima les universités et créa les grandes écoles, puis au XIXe siècle, lorsque l'État mit sous tutelle l'enseignement supérieur et la recherche, il apparut nécessaire de se délivrer d'un pouvoir trop pesant. Ensuite, dans la seconde moitié du XXe siècle, lorsque la recherche scientifique devint un facteur indispensable à la compétitivité économique, il fallut s'assurer que les impératifs des entreprises visant des objectifs appliqués et à court terme ne l'emporteraient pas sur d'autres finalités à plus longue échéance. Aujourd'hui, il s'agit plutôt d'éviter que des groupes, qu'ils aient des motivations politiques, religieuses ou morales, exercent des pressions et censurent certaines manifestations, comme ce fut le cas en mars 2019 lorsque des militants « décoloniaux » empêchèrent une représentation des *Suppliantes* d'Eschyle à la Sorbonne en dénonçant le caractère prétendument raciste de l'utilisation de

masques et maquillage noirs par des acteurs blancs ; ou lorsqu'a été annulée, à l'université Bordeaux Montaigne la même année, sous la menace d'associations étudiantes, une conférence de la philosophe Sylviane Agacinski, opposée à la GPA, sur « l'être humain à l'époque de sa reproductibilité technique ».
Partout, la liberté et l'indépendance des enseignants-chercheurs et des chercheurs s'imposent comme nécessaires à l'exercice de leurs missions : transmettre et rechercher des connaissances nouvelles. Une Église ou un intégrisme trop soucieux du respect des dogmes n'autoriseraient pas à enseigner les idées qui s'en affranchiraient ; encore moins à les découvrir. Il en irait de même d'un État peu disposé à accepter des conceptions adverses aux siennes. À cela, il faut ajouter que les conditions économiques ont changé : au Moyen Âge, les étudiants payaient les professeurs ; depuis le XIXe siècle et jusqu'à il y a peu, l'État était le principal bailleur de fonds des universités. Aujourd'hui, pour des raisons tant pécuniaires que politiques, l'État envisage des sources de financement complémentaires, par des entreprises, les étudiants eux-mêmes, voire d'autres institutions comme des congrégations religieuses, des États étrangers ou des associations. C'est un point crucial : les libertés académiques se distinguent des libertés civiles en ne portant pas simplement sur l'absence de contraintes, mais sur les soutiens matériels requis pour mener des recherches de qualité.

À l'université, il s'agit d'éviter que des groupes exercent des pressions et censurent certaines manifestations

PRINCIPES DE TOLÉRANCE ET D'OBJECTIVITÉ

Les philosophes contemporains, comme Isaiah Berlin (2), distinguent souvent deux types de libertés : les libertés qualifiées de négatives – appelées *« la liberté des Modernes »* par Benjamin Constant – et les libertés positives – ou *« la liberté des Anciens »*, qui offrait aux hommes libres de l'Antiquité la possibilité d'exercer leur citoyenneté en participant aux débats publics et aux votes qui s'ensuivaient (3). D'un côté, nous avons affaire à des libertés dites fondamentales – liberté de réunion, de culte, d'expression, d'aller et venir, etc. – que garantit une absence de contraintes, ce qui explique qu'on les caractérise comme étant négatives ; d'un autre côté, on considère la capacité à agir effectivement, à influer sur la politique de la cité, à être écouté, à convaincre, à se déplacer… Tout en s'opposant les unes aux autres, les libertés négatives et positives se révèlent complémentaires : ainsi, la liberté de choisir sa profession et son commerce ne vaut que si l'on dispose de l'éducation requise et si l'on a les moyens de son installation. De ce point de vue, les libertés académiques relèvent des libertés positives : elles procurent aux chercheurs et enseignants de l'université les moyens requis pour transmettre et accroître les savoirs dans l'horizon de la vérité qui est le leur. Pour reprendre les mots de Jacques Derrida dans *L'Université sans condition* (Galilée, 2001), *« l'université fait profession de la vérité »* et cela nécessite *« une liberté inconditionnelle de questionnement et de propositions, voire, plus encore, le droit de dire publiquement tout ce qu'exigent une recherche, un savoir et une pensée de la vérité »*. On ne saurait y soustraire aucun préalable, aucune clause au débat. En cela, l'université demande une liberté sans condition. Et, du fait même des interrogations infinies qu'elle suscite et des solutions inédites qu'elle propose et discute, elle réclame des libertés positives qui n'ont rien de commun avec une simple liberté d'expression des opinions. Cette dernière ne tient qu'à l'absence de censure, sous réserve du respect des lois (par exemple qu'il n'y ait ni diffamation, ni incitation à la violence, ni discrimination).
L'université, elle, demande plus. Des moyens matériels, d'abord. Mais aussi, en regard des facilités qu'on lui accorde et de la tâche qu'elle s'assigne, une méthode rigoureuse reposant sur des fondements épistémologiques solides. Cela requiert l'écoute, l'ouverture aux argumentations les plus diverses et à toutes les hypothèses, même déconcertantes, dans la mesure où elles reçoivent un fondement rationnel. Pour reprendre les termes de la loi, cela veut dire que l'université se doit d'adopter un principe de tolérance. Pour que l'on dépasse les querelles de chapelles, que l'on ne ressasse pas sans cesse de vieilles idées, qu'on ne se laisse pas non plus dominer par des figures d'autorité qui l'emporteraient du seul fait de leur éminence, les disputes doivent affronter l'épreuve des faits, exigence qui répond, elle, au principe d'objectivité. Bref, le respect de valeurs, fussent-elles louables comme la laïcité, l'antiracisme ou la défense de l'égalité des sexes, ne saurait limiter la liberté académique en imposant des présupposés à la preuve scientifique et à l'activité de refondation permanente et inconditionnelle du savoir à laquelle doit se vouer l'université. ■

(1) Article L. 952-2 du code de l'éducation issu de la loi Savary de 1984.

(2) Isaiah Berlin, *Four Essays on Liberty,* Oxford University Press, 1969 (traduction française : *Éloge de la liberté,* Calmann Lévy, 1994).

(3) Benjamin Constant, « De la liberté des Anciens comparée à celle des Modernes », 1819, in *Écrits politiques*, Gallimard, 1997.

Jean-Gabriel Ganascia est professeur d'informatique à Sorbonne Université. Il préside le comité d'éthique du CNRS (Comets).
Les vues exprimées dans cette chronique n'engagent que leur auteur.

◀ *Au commencement était le Verbe, et comprendre le Verbe n'est pas une mince affaire, même quand il se matérialise dans des graphismes tels ceux qui ont participé au succès du film* Premier contact, *sorti en 2016.*

Les auteurs de science-fiction s'aventurent parfois sur les pistes ouvertes par les thèses de linguistique. Explorées, exagérées, décuplées, déformées, voire dénaturées, elles ont donné naissance à un courant encore peu connu : la linguistique-fiction.

Astrolinguistique : parlez-vous alien ?

Frédéric Landragin
DIRECTEUR DE RECHERCHE AU CNRS, LABORATOIRE LATTICE, ÉCOLE NORMALE SUPÉRIEURE DE PARIS

COLL. CHRISTOPHE L. - © 21 LAPS ENT. / FILMNATION ENT. / LAVA BEAR FILMS / XENOLINGUISTICS - DR

Le film *Premier contact* (2016), de Denis Villeneuve, met en scène une linguiste qui tente d'échanger avec les heptapodes, des extraterrestres fraîchement arrivés sur Terre. Mais comment s'en faire comprendre ? Cette question cruciale, qui est la trame du film, nous entraîne dans les arcanes d'une branche de la science-fiction où l'intrigue repose sur une théorie linguistique. Le point est à souligner car la science-fiction s'oriente plus volontiers vers des questions relevant de la physique, de la chimie ou de la biologie. Pour marquer le coup, nous en venons à parler de « linguistique-fiction ». La linguistique, comme les autres sciences, est parsemée de nombreuses théories. Commençons par les plus influentes.

Connu pour ses idées politiques et son engagement pour la liberté d'expression, l'Américain Noam Chomsky a surtout donné un nouvel élan à la linguistique, en adoptant, dès les années 1950, une démarche très méthodique, plus coutumière des sciences dites « dures » que des sciences humaines. Pour celui qui fut, jusqu'en 2017, professeur émérite au Massachusetts Institute of Technology (MIT), étudier le langage humain peut se faire à l'aide de formalisations, c'est-à-dire de formules qui n'ont rien à envier aux équations mathématiques ni aux techniques utilisées en programmation informatique. Il a ainsi proposé la notion de « grammaire générative », qui montre comment générer – disons produire – des phrases à partir d'autres phrases : on opère des transformations sur l'ordre des mots et les fonctions grammaticales, deux caractéristiques regroupées sous le nom de « syntaxe ». Il est ainsi possible de transformer, par exemple, une phrase à la voix active en une phrase équivalente à la voix passive : « Les martiens ont utilisé un traducteur automatique » ; « Un traducteur automatique a été utilisé par les martiens ». À partir d'études des structures syntaxiques observables dans plusieurs langues, il a défendu l'existence de structures profondes. Celles-ci permettent d'obtenir plusieurs phrases dotées de structures de surface variées. Cette notion incite à postuler l'existence d'une structure « universelle », similaire dans toutes les langues, les structures de surface restant spécifiques à chaque langue. Noam Chomsky soulève ainsi la question de l'universalité, qui conduit à la théorie dite de « l'innéisme » : les humains naissent-ils tous avec la

faculté de langage, autrement dit avec des structures mentales préétablies ? Pour le chercheur, la réponse est oui. Très débattues en sciences, au point de susciter de la méfiance, ses théories ont été considérées avec beaucoup moins de pincettes en science-fiction. De nombreux auteurs, dont les Britanniques John Brunner (1934-1995) et Ian Watson (né en 1943), ont rebondi sur les idées de Noam Chomsky, quitte à étendre à l'ensemble des aspects linguistiques les propos de celui-ci sur la syntaxe. Dans *L'Enchâssement* (1973) par exemple, Ian Watson suppose qu'une même structure fondamentale existe pour toutes les langues… y compris pour d'hypothétiques langues extraterrestres. Il articule les trois intrigues de son roman autour du mécanisme « d'enchâssement » cher au linguiste américain. Enchâsser revient à mettre une phrase dans une phrase, comme le fait une subordonnée relative ou des parenthèses, et constituerait un mécanisme universel. Et l'écrivain britannique rapproche cette grammaire universelle d'une structure universelle de l'Univers. Cela lui permet de supposer que les extraterrestres développent des langues comparables aux nôtres, même si ces langues se matérialisent très différemment, par exemple avec l'usage de couleurs ou de gestes plutôt que de sons articulés.

Mais ces théories sont-elles crédibles ? Car force est de constater que les langues humaines se caractérisent par leur diversité : plus de 7 000 langues sont parlées actuellement sur Terre. Leur nombre est tel qu'il est très difficile, pour ne pas dire impossible, d'identifier des caractères que l'on retrouve dans toutes. Même les noms communs et les verbes, indispensables à tout locuteur du français, n'existent pas dans toutes les langues. Pareil pour le singulier et le pluriel ou le masculin et le féminin, notions qui nous paraissent sans doute pourtant bien universelles. Quel que soit le phénomène linguistique considéré, il est toujours possible de trouver une langue qui fait exception, et on peine donc à identifier une structure commune profonde. De quoi remettre en cause les idées de Noam Chomsky ? Peut-être bien, car il existe au moins une langue qui ne connaît pas l'enchâssement. Non, se défend celui-ci, qui affirme qu'un humain, quelle que soit sa langue maternelle, est capable d'apprendre le mandarin, le pirahã (langue d'un peuple de chasseurs-cueilleurs d'Amazonie brésilienne), le hopi (parlé par un groupe amérindien vivant en Arizona) ou le hongrois : c'est donc bien qu'il a cette fameuse « faculté de langage ». Certes, pourrait-on encore rétorquer, mais ce que l'on peut

▲ *Frissons garantis au moment où les extraterrestres de* Premier contact *commencent à communiquer grâce à des cercles d'encre projetés sur un mur de verre. Mais que de tâtonnements avant que les chercheurs en linguistique puissent déchiffrer et donc comprendre leur écriture !*

aisément exprimer avec la langue A peut poser bien des difficultés avec la langue B. Par exemple, si A comporte sept mots pour désigner les couleurs de l'arc-en-ciel, B peut n'en comporter que trois… Allons plus loin : ces contraintes n'ont-elles pas des conséquences sur la représentation des couleurs ? Les locuteurs de B n'en perçoivent-ils vraiment que trois dans l'arc-en-ciel ? C'est tout l'objet de l'hypothèse de Sapir-Whorf, que la science-fiction a largement exploitée et qu'il est intéressant de développer.

Initialement, le linguiste et anthropologue américain Edward Sapir (1884-1939) menait des recherches sur les liens entre langue et culture. L'un de ses élèves, Benjamin Lee Whorf (1897-1941), apporta sa contribution, notamment sur le verbe dans la langue hopi. En français, le verbe code le temps avec les conjugaisons que nous connaissons tous : présent, futur, passé simple, etc. Dans la langue hopi, comme dans d'autres, plusieurs de ces temps n'existent pas et sont exprimés d'une autre manière, comme nous le faisons avec le verbe « aller » pour exprimer le futur (« je vais boire du jus de sapho *[boisson fictive dans le cycle de* Dune, *NDLR]* » est une phrase au présent exprimant un futur). Mais, contrairement à la langue hopi, le français permet plus difficilement de transmettre l'« aspect », c'est-à-dire le fait que l'événement décrit par le verbe est en cours, terminé ou en train de commencer. On peut dire : *« Je suis en train de boire un jus de sapho »* ou *« J'ai terminé de boire… »*. Mais il n'existe pas de conjugaison spécifique du verbe pour exprimer directement l'aspect. Sur cette base, Benjamin Lee Whorf affirma donc que les Indiens hopi n'avaient pas la même perception du temps que les locuteurs de la plupart des langues occidentales. Cela a mené à une généralisation que l'on connaît en tant qu'« hypothèse de Sapir-Whorf » : la langue d'une société influence la façon dont ses membres perçoivent le monde. En science, l'hypothèse de Sapir-Whorf fut l'objet de nombreux débats et controverses. On reprocha à Whorf – ingénieur dans une compagnie d'assurances et ni linguiste ni anthropologue de formation – d'avoir généralisé trop facilement.

LES PRÉCURSEURS EN V.O.

▲ *George Orwell,* Nineteen Eighty-Four, *Secker and Warburg, 1949.*

▲ *Jack Vance,* The Languages of Pao, *Avalon Books, 1958.*

▲ *Samuel R. Delany,* Babel-17, *Ace Books, 1966.*

Plus de 7 000 langues sont parlées actuellement sur Terre

Le débat a conduit à distinguer deux interprétations de leur hypothèse. La première est appelée « relativisme linguistique » : la langue influence notre façon de percevoir le monde, sans pour autant contraindre fortement le locuteur. Ainsi, si le nombre de termes disponibles pour désigner les couleurs a une influence sur leur perception par les locuteurs, un petit effort suffit pour désigner des couleurs pour lesquelles aucun terme n'existe. En français par exemple, cela nous incite à utiliser « rouge foncé », « rouge clair » ou « rouge orangé » pour décrire les nuances du rouge. L'utilité de termes distincts est toute relative puisque l'ajout d'un simple adjectif règle la question. La seconde interprétation est appelée « déterminisme linguistique » : cette fois, il s'agit bien d'une contrainte dans la perception du monde. Et c'est cette interprétation qui a été clairement privilégiée par la science-fiction. On la retrouve ainsi dans *Nous* (1920) de l'écrivain russe Ievgueni Zamiatine, *1984* (1949) de George Orwell, *Les Langages de Pao* (1958) de Jack Vance, *Babel-17* (1966) de Samuel R. Delany et plus récemment dans *L'Histoire de ta vie* (1998) de Ted Chiang, qui est la nouvelle adaptée au cinéma sous le titre *Premier contact*.

Chacun de ces romans se construit en effet sur le déterminisme linguistique. Dans *Nous*, la première personne du singulier « je » est interdite par l'État unitaire, de manière que les gens ne se pensent pas comme des individus mais comme des membres de la société. Les romans d'Orwell et de Vance montrent également un gouvernement

COLLECTION CHRISTOPHEL © 21 LAPS ENTERTAINMENT / FILMNATION ENTERTAINMENT / LAVA BEAR FILMS / XENOLINGUISTICS - COLL. PART.

imposant une nouvelle langue à son peuple, dans le but de contrôler son comportement. Le vocabulaire devient plus agressif et accroît ainsi la force de l'armée. Dans *Babel-17,* Samuel R. Delany narre une invasion extraterrestre opérée par le langage : en tentant d'apprendre la langue des envahisseurs, les humains se mettent à percevoir le monde comme eux et deviennent ainsi des traîtres à leur cause. Quant à la linguiste Louise Banks, personnage de *L'Histoire de ta vie,* elle incarne totalement l'hypothèse de Sapir-Whorf, car plus elle progresse dans l'apprentissage de la langue des heptapodes, plus elle est la proie de visions… Ainsi, comme à leur habitude, les auteurs de science-fiction se sont emparés d'une idée scientifique et en ont exploré toutes les facettes. Ils en ont imaginé les conséquences possibles, même les plus improbables. Le résultat relève d'expérimentations irréalisables dans la vraie vie… Pour tous les amateurs de romans de linguistique-fiction, la liste ci-avant constitue un premier guide de ce courant encore peu connu, qui explore bien d'autres théories scientifiques que celles de Noam Chomsky et de Sapir-Whorf.

C'est ainsi le cas de la sémantique générale d'Alfred Korzybski (1879-1950), théorie censée étendre la portée de la sémantique – partie de la linguistique étudiant les significations – et servir de remède aux maladies psychosomatiques. Inutile de s'attarder sur cette proposition qui n'a rien de linguistique, ni même de scientifique. Notons toutefois qu'elle a attiré l'attention de John W. Campbell, écrivain américain et célèbre rédacteur en chef de magazines de science-fiction, et a ainsi inspiré de nombreux auteurs de l'âge d'or de ce genre littéraire, de la fin des années 1930 à la fin des années 1950.

Il est plus intéressant d'explorer ce que les auteurs ont imaginé autour d'une branche de la linguistique – la diachronie –, qui étudie l'évolution des langues dans le temps : par exemple, le français du Moyen Âge se révèle fort différent du français contemporain. Nul besoin de souligner que les voyages dans le temps et l'espace sont omniprésents en science-fiction. Et les écrivains mettent ainsi régulièrement en scène un voyageur temporel qui n'arrive pas à comprendre ce que disent les gens qu'il rencontre dans le passé, ou qui, profitant d'un petit tour dans le futur, observe les évolutions à venir du français ou de l'anglais. Avec l'humour qui le caractérise, l'Américain Robert Sheckley (1928-2005) a ainsi centré sa nouvelle *Voulez-vous parler avec moi ?* sur la diachronie, mais en mode accéléré. Un humain nommé Jackson, bien décidé à acheter une planète, se heurte aux natifs, les naïens, bien difficiles à convaincre. Or ceux-ci ont la capacité de faire évoluer leur langue (le hon) quasiment à volonté, comme Jackson va l'apprendre à ses dépens. Au début, il catégorise le hon en tant que langue isolante et à tons, comme le mandarin, et l'apprend aisément. Mais, de jour en jour, des termes inconnus apparaissent lors de ses interactions avec les naïens, et son apprentissage se complique. Plus Jackson demande des explications, plus il se sent démuni face à la profusion de changements jusqu'à ce que, découragé, il finisse par retourner sur Terre.

Les auteurs de science-fiction explorent toutes les facettes d'une idée scientifique

Vient enfin le cas fascinant de la première rencontre avec des extraterrestres : des petits hommes verts débarquant sur Terre en maîtrisant l'anglais-américain aux mystérieux heptapodes de *Premier contact,* les situations fourmillent d'imagination. L'alien (l'autre) est parfois un alter ego de l'humain, parfois un super-prédateur ou une transposition à peine déguisée du colonialiste. Lorsque l'alien possède sa propre langue ou son propre système de communication, on entre de plain-pied dans les difficultés de la linguistique de terrain : comment communiquer avec quelqu'un dont on ne connaît rien, et avec qui on ne partage aucun mot ?

L'intérêt majeur du contact face à face est de nouer une relation en procédant pas à pas. Par l'intermédiaire de la linguiste Louise Banks, Ted Chiang l'explique ainsi dans *L'Histoire de ta vie : « La seule façon d'apprendre une langue inconnue, c'est de nouer une relation avec un locuteur natif, autrement dit de lui poser des questions, de tenir une conversation, et ainsi de suite. Si vous souhaitez maîtriser la langue des extraterrestres, un linguiste, moi ou quelqu'un d'autre, devra donc discuter avec l'un d'eux. Les enregistrements ne suffiront pas. »* Mais quand Louise Banks se retrouve face aux heptapodes, rien n'est simple. Très vite, la langue orale, trop compliquée à analyser, est oubliée pour laisser place à la langue écrite, avec ces fameux graphismes circulaires qui ont contribué au succès du film. À l'oral comme à l'écrit, le pas à pas ne fonctionne que si l'on peut interpréter correctement la réaction de l'autre, typiquement la confirmation et l'infirmation : *« Oui, ça ! »* ou *« Non, tu te trompes »*. Ainsi, on peut vérifier à chaque étape de compréhension si la voie suivie est la bonne et on peut ainsi progresser sur une base solide. Pour choisir des mots, le plus simple revient à utiliser ceux qui désignent des objets visibles en situation d'interaction,

▲ *On ne saurait blâmer les heptapodes de* Premier contact *de se demander quel message on essaie de leur faire passer, si message il y a… Cet écriteau désigne-t-il le nom de l'humain qui leur fait face, de son espèce ou de l'objet qu'il brandit ?*

en commençant par les participants. C'est ainsi que Louise apparaît avec un écriteau portant la mention « human » et se désigne elle-même. Plus tard, on voit son acolyte, Ian, marcher à côté d'un écriteau indiquant « Ian marche ». Les mots de la langue sont introduits un à un, avec à chaque fois une représentation ou un mime – sorte d'imagier grandeur nature. *Premier contact* ne montre pas les étapes successives, car le processus est très long. La difficulté étant de déterminer si les heptapodes comprennent bien ce qui est énoncé. Quand Louise tient l'écriteau « human », comment être sûr qu'ils comprennent qu'elle parle de son espèce, et pas uniquement d'elle ou de son écriteau ? Chaque étape nécessiterait une validation, en demandant une confirmation ou en provoquant une infirmation, par exemple en désignant le mur avec l'écriteau « human ». Si les heptapodes confirment que le mur est « humain », cela peut signifier deux choses : soit il y a malentendu et ils n'ont pas compris ce que désigne le mot « humain », auquel cas il faut tout reprendre ; soit ils considèrent que le mot « humain » est un concept regroupant à la fois les personnes et les murs. Dans ce cas, l'enjeu est d'expliquer que le terme « humain » se restreint à des personnes.

Une anecdote imaginaire, commune au film et à la nouvelle, illustre bien les difficultés et les pièges de l'interaction : *« James Cook* [navigateur et explorateur britannique du XVIIIe siècle, NDLR] *prit la tête d'un groupe d'exploration et rencontra des Aborigènes. Un des marins désigna les animaux qui sautillaient, portant leur petit dans une poche ventrale. Il demanda à un Aborigène comment on les appelait. L'autre répondit :* "Kangourou." *Dès lors, Cook et ses hommes firent référence à ces animaux sous ce nom. Ils n'apprirent que plus tard que "Kangourou" signifiait "Qu'est-ce que vous avez dit ?" »* Le philosophe du langage Willard V. O. Quine (1908-2000) a développé ce problème sous le nom de « gavagai ». Un linguiste fait face à un homme d'une langue inconnue, un lapin détale à proximité et le locuteur s'exclame : *« Gavagai ! »* Qu'est-ce que cela peut signifier ? Et comment le vérifier ? Parmi les sens possibles, on imagine : « lapin », « blanc », « animal », « animal blanc », « animal rapide »… ; mais également « oh, tu as vu ? », « malédiction ! »… Pour le contrôler, il n'y a pas beaucoup de possibilités : on choisit un paramètre et on tente de susciter une situation similaire, dans laquelle seul varie le paramètre retenu. On essaie alors « gavagai » et on guette la réaction de l'homme. Si celle-ci est identique à la situation précédente, c'est que le paramètre n'intervient pas. Sinon, c'est que le mot « gavagai » le concerne. Mais encore faut-il arriver à faire courir un lapin gris ou un chat blanc. L'imagier pour enfants n'est pas une mauvaise solution, finalement… Tout ceci ne représente cependant qu'un point de départ, car les langues permettent d'évoquer non seulement des objets visibles en situation d'interaction, mais aussi et surtout des objets situés ailleurs, des notions abstraites (la justice, l'éthique…), ou encore des événements passés ou à venir… ■

Pour en savoir plus

■ **Noam Chomsky,** *Aspects de la théorie syntaxique,* Seuil, 1971.
■ **Noam Chomsky et George A. Miller,** *L'Analyse formelle des langues naturelles,* Mouton, 1968.
■ **Nicholas Evans et Stephen C. Levinson,** « The Myth of Language Universals », *Behavioral and Brain Sciences, 32,* p. 429, 2009 (en anglais).
■ **Frédéric Landragin,** *Comment parler à un alien ?,* Bélial, 2018.
■ **Willard V. O. Quine,** *Le Mot et la Chose,* Flammarion, 1977.
■ **Nicolas Tournadre,** *Le Prisme des langues,* L'Asiathèque, 2014.
■ **Marina Yaguello,** *Les Langues imaginaires,* Seuil, 2006.

COLL. CHRISTOPHEL © 21 LAPS ENTERTAINMENT / FILMNATION ENTERTAINMENT / LAVA BEAR FILMS / XENOLINGUISTICS

Abonnez-vous à La Recherche

et recevez

4 numéros trimestriels
EN VERSION PAPIER

+

PLUS DE **25%** DE RÉDUCTION

L'ACCÈS À LA VERSION NUMÉRIQUE
de ces 4 numéros

BULLETIN D'ABONNEMENT

À compléter et à renvoyer sous enveloppe affranchie à : La Recherche, Service abonnements 45, avenue du Général Leclerc - 60643 Chantilly Cedex

La Recherche

OUI, je m'abonne pour 1 AN à La Recherche soit 4 numéros trimestriels en version papier et numérique pour 29 € au lieu de ~~39,60€~~*. Je réalise plus de 10 € d'économie.

J'indique ci-dessous mes coordonnées : ☐ M. ☐ Mme ☐ Mlle

PLRC564

Nom : ..... Prénom : .....

Adresse : .....

.....

Code postal : [ ][ ][ ][ ][ ] Ville : .....

Téléphone : [ ][ ][ ][ ][ ][ ][ ][ ][ ][ ]

Pour accéder à la version numérique de vos numéros, merci d'indiquer votre email :

..... @ .....

☐ **J'accepte de recevoir par mail, des offres des partenaires de La Recherche.**

Mon mode de règlement :

Je règle par :

☐ **Chèque bancaire ou postal à l'ordre de La Recherche**

☐ **Carte bancaire** N° [ ][ ][ ][ ] [ ][ ][ ][ ] [ ][ ][ ][ ] [ ][ ][ ][ ]

Date d'expiration [ ][ ] [ ][ ]

Signature obligatoire :

* Vous pouvez acquérir séparément chacun des numéros trimestriels de La Recherche au prix unitaire de 9,90 €. Offre réservée exclusivement aux nouveaux abonnés résidant en France métropolitaine. Service abonnements France : 01 55 56 71 15. Renseignements et tarifs pour l'étranger : 00 33 1 55 56 71 15. Les Éditions Croque Futur situées au 41 Bis Avenue Bosquet, Paris 7e est responsable de traitement et collecte des données afin de servir votre abonnement. Vos données pourront être transmises à d'autres organismes (presse, VAD, caritatif) et sont conservées pour une durée de 7 ans à partir de votre désabonnement. Vous pouvez exercer vos droits d'accès, de rectification, de limitation, de portabilité, d'opposition, d'effacement au traitement de vos données et définir vos directives post-mortem à l'adresse mail suivante : dpo@sophiapublications.fr en joignant une copie de votre carte d'identité. Les Éditions Croque Futur disposent d'un délégué à la protection des données pouvant être contacté au 41 Bis Avenue Bosquet, Paris 7e ou à l'adresse mail dpo@sophiapublications.fr. À tout moment vous pouvez introduire une réclamation auprès de la CNIL.

La Recherche

Sciences et Avenir / La Recherche : 41 bis, avenue Bosquet 75007 Paris. Tél.: 0155355600 • e-mail rédaction: courrier@larecherche.fr • **Site Internet:** larecherche.fr • Pour joindre directement par mail un membre de la rédaction, libellez l'adresse sur le modèle: prénom.nom suivi de @larecherche.fr (sans accents).

Pour toute question concernant votre abonnement: Adresse: *La Recherche,* 45, avenue du Général Leclerc 60 643 Chantilly Cedex. **Tél.:** 0155567115. • **ABONNEMENTS: Tarif France:** 1 an 10 nos + 1 n° double + 4 trimestriels 59 euros. **Tarif international:** nous contacter. **E-mail:** abo.recherche@groupe-gli.com • **Suisse:** Edigroup. Tél.: 022860 84 01 • **Belgique:** Edigroup. Tél.: 070233304.

La Recherche est publiée par Croque Futur • **Président et directeur de la publication:** Claude Perdriel • **Directeur général:** Philippe Menat • **Directeur éditorial:** Maurice Szafran • **Directrice de la rédaction:** Dominique Leglu • **Directrice adjointe de la rédaction:** Carole Chatelain • **Rédacteur en chef:** Philippe Pajot • **Rédacteur en chef adjoint:** Vincent Glavieux • **Conception graphique, couverture:** Dominique Pasquet • **Directeur artistique:** Jean-Louis Gilabert • **Rédactrice en chef adjointe photo :** Andreina de Bei • **Service photo:** Claire Balladur, Isabelle Tirant • **Première secrétaire de rédaction:** Anaëlle Bruyand • **Chefs de rubrique:** Mathias Germain, Sylvain Guilbaud • **Ont collaboré à ce numéro:** Mehdi Benyezzar, Julien Bourdet, Bruno Bourgeois, Loïc Chauveau, Franck Daninos, Mehdi Harmi, Sylvie Rouat, Grégoire Ader, Laurence Lefebvre, Sylviane Savatier • **Fabrication:** Christophe Perrusson, Thibault Quéré • **Activités numériques:** Bertrand Clare • **Directeur des ventes et promotion:** Valéry Sourieau • **Vente messageries VIP-diffusion:** Frédéric Vinot • Numéro vert 0800 51 49 74 • **Directeur des abonnements:** Luc Bonardi • **Responsable gestion abonnements:** Magali Viette • **Responsable du marketing direct:** Linda Pain • **Responsable administratif et financier:** Jaye Reig • **Comptabilité :** Mélanie Benkhedimi • **Diffusion librairies :** Pollen DIF'POP'. Tél.: 0143620807 Fax: 0172718451 • **Régie publicitaire:** MediaObs 44, rue Notre-Dame-des-Victoires 75002 Paris. Tél.: 0144889770.Fax: 0144889779 • e-mail: pnom@mediaobs.com • **Pour joindre directement une personne,** composez le 01 44 88, suivi des quatre chiffres placés après son nom. • **Directeur général:** Corinne Rougé (93 70) • **Directeur commercial:** Christian Stefani (93 79) • **Directeur du pôle Sciences:** Sylvain Mortreuil (97 75) • **Studio/Maquette/Techniques:** Cédric Aubry (89 05) • **Imprimerie:** RotoFrance Impression (Lognes). Dépôt légal à parution. Les titres, les intertitres, les textes de présentation et les légendes sont établis par la rédaction du trimestriel. La loi du 11 mars 1957 interdit les copies ou reproductions destinées à une utilisation collective. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur, ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite (article L.122-4 du Code de propriété intellectuelle). Toute copie doit avoir l'accord du Centre français du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris. Tél.: 0144074770.Fax: 0146346719). L'éditeur s'autorise à refuser toute insertion qui semblerait contraire aux intérêts moraux ou matériels de la publication. Commission paritaire: 0924 K 85863. ISSN 0029-5671.

CRÉDITS DE LA COUVERTURE : ED ALCOCK (F. COMBES) - ANAMIKA DEY (A.K. GUPTA) NASA/HUBBLE SPACE TELESCOPE/JIMMY WALKER - NASA - DEM10/GETTY IMAGES

Origine du papier : Suède - Taux de fibres recyclées : 0 % - Eutrophisation. PTot = 0,003 kg/tonne de papier. Ce magazine est imprimé chez RotoFrance Impression (Lognes), certifié PEFC.

ENTREPRISES, COLLECTIVITÉS, FINANCEZ VOS BESOINS DE RECHERCHE,

DANS LES DOMAINES DES PROCÉDÉS TECHNOLOGIQUES, DES SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA VIE, DES SCIENCES HUMAINES ET SOCIALES

Dans le cadre d'un partenariat entre un étudiant, son laboratoire d'accueil et vous, l'ADEME vous aide à produire des connaissances nouvelles et renforce les capacités humaines de votre R&D en finançant un doctorant pendant 3 ans !

ENSEMBLE POUR CONSTRUIRE UN MONDE PLUS DURABLE

www.ademe.fr/theses

ADEME
AGENCE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE, DU DÉVELOPPEMENT DURABLE ET DE L'ÉNERGIE
MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION NATIONALE, DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE

CONCEPTION & RÉALISATION GRAPHIQUE : OLFA NEMSI

LES 23 SCIENTIFIQUES QUI ONT PARTICIPÉ À CE NUMÉRO

Jean-Pierre Bibring, *astrophysicien,* professeur émérite, université Paris-Saclay
Daniel Boy, *politologue,* directeur de recherche émérite, Fondation nationale des sciences politiques, Paris
Chloé Clavel, *informaticienne,* enseignante-chercheuse, Télécom Paris
Françoise Combes, *astrophysicienne,* Médaille d'or du CNRS, professeure au Collège de France, Paris
Marie Dégremont, *politologue,* chercheuse, Institut d'études politiques, Paris
Jean-Paul Demoule, *protohistorien,* professeur émérite, université Paris 1 Panthéon-Sorbonne
Catherine Dulac, *neurobiologiste,* professeure, université Harvard, États-Unis
François Forget, *planétologue,* directeur de recherche, CNRS, Institut Pierre-Simon-Laplace, Paris
Frédéric Foucher, *physicien,* ingénieur de recherche, CNRS, Centre de biophysique moléculaire, Orléans
Jean-Gabriel Ganascia, *informaticien,* professeur, Sorbonne Université, Paris
Anil K. Gupta, *innovateur,* ancien professeur, Institut indien de management, Ahmedabad, Inde
Keyron Hickman-Lewis, *géologue,* chercheur, Muséum d'histoire naturelle de Londres, Royaume-Uni
Frédéric Landragin, *linguiste,* directeur de recherche, CNRS, École normale supérieure, Paris
Christophe Malaterre, *philosophe des sciences,* professeur, université du Québec à Montréal, Canada
Marie-Christine Maurel, *biologiste et biochimiste,* professeure, Sorbonne Université, Paris
Joseph Moran, *chimiste,* professeur, CNRS, université de Strasbourg
Philippe Nghe, *biochimiste,* maître de conférences, École supérieure de physique et de chimie industrielles de la ville de Paris
Sean Raymond, *astrophysicien,* chargé de recherche, CNRS, laboratoire d'astrophysique de Bordeaux
Théo Ryffel, *informaticien,* doctorant, École normale supérieure, Inria, Paris
Claudio Smiraglia, *géographe,* ancien professeur, université de Milan, Italie
Jean-Sébastien Steyer, *paléontologue,* chercheur, CNRS, Muséum national d'histoire naturelle, Paris
Gabriel Tobie, *planétologue,* chargé de recherche, CNRS, laboratoire de planétologie et géodynamique, Nantes
Frances Westall, *géologue,* directrice de recherche, CNRS, Centre de biophysique moléculaire, Orléans

NOUVELLE FORMULE

148 pages
MAGAZINE-LIVRE
Trimestriel

La Recherche
LE MAGAZINE DE RÉFÉRENCE SCIENTIFIQUE

L 13412 - 564 - F: 9,90 € - RD

• ALLEMAGNE 11.20 € • BELGIQUE 10.90 € • LUXEMBOURG 10.90 € • ITALIE 10.90 € • ESPAGNE 10.90 € • GRÈCE 10.90 €
• PORTUGAL PORT-CON 10.90 € • SUISSE 15.90 CHF • DOM/S 10.90 € • DOM/A 11 € • CANADA 16.50 $CAN
• TOM/S 1320 XPF • TOM/A 2000 XPF • MAROC 102 MAD • TUNISIE 14.40 TND